

UNIVERSIDAD DE ELSALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
SECCIÓN DE FÍSICA



TRABAJO DE GRADUACIÓN:

**ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVES DEL SUELO Y SU RELACIÓN
CON LA TEMPERATURA DEL AIRE PARA LA ESTACIÓN
METEOROLÓGICA DE EL PAPALÓN**

PRESENTADO POR:

PROF. WENDY ROCIO RIVERA LÓPEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADA EN FÍSICA

SEPTIEMBRE DE 2006

SAN MIGUEL,

EL SALVADOR,

CENTRO AMÉRICA

AUTORIDADES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTORA:

DRA. MARÍA ISABEL RODRÍGUEZ

VICERRECTOR ACADÉMICO:

ING. ORLANDO MACHUCA

SECRETARIA GENERAL:

LICDA. ALICIA MARGARITA RIVAS DE RECINOS

FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL

DECANO:

LIC. MARCELINO MEJIA GONZÁLEZ

VICEDECANO:

LIC. NELSON DE JESÚS QUINTANILLA GÓMEZ

SECRETARIA:

LICDA. LOURDES ELIZABETH PRUDENCIA COREAS

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

JEFE DEL DEPARTAMENTO:

LICDA. MARÍA DEL TRÁNSITO GUTIÉRREZ

COORDINADOR SECCIÓN DE FÍSICA:

LIC. OSCAR REINALDO HERNÁNDEZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD MULTIDISCIPLINARIA ORIENTAL
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICAS
SECCIÓN DE FÍSICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN:

ESTUDIO DEL FLUJO DE CALOR A TRAVÉS DEL SUELO Y SU RELACIÓN
CON LA TEMPERATURA DEL AIRE PARA LA ESTACIÓN
METEOROLÓGICA DE EL PAPALÓN

PRESENTADO POR:

PROF. WENDY ROCIO RIVERA LÓPEZ

PARA OPTAR AL GRADO DE:

LICENCIADA EN FÍSICA

ASESORES DE LA INVESTIGACIÓN:

LICDA. TELMA ELIZABETH JIMÉNEZ MURILLO

DOCENTE DIRECTOR

LIC. OSCAR ARMANDO CALDERÓN CASTELLANOS

DOCENTE DIRECTOR

SEPTIEMBRE DE 2006

DEDICATORIAS

A DIOS TODO PODEROSO: por acompañarme en cada instante de mi vida y sobre todo, por brindarme salud, paciencia, fortaleza y sabiduría durante el desarrollo de toda mi carrera.

A MIS PADRES: MARINA GLADIS y JOSÉ OSCAR

Por brindarme la vida, su cariño, su confianza y su apoyo incondicional durante mi carrera. Sin su ilimitado el amor de padres, su comprensión y sus buenos consejos no estaría cosechando este maravilloso triunfo. GRACIAS MAMÁ Y PAPÁ.

A MI HIJA: HEISSEL YASMÍN

Porque eres el mayor regalo que Dios ha podido darme, tú me has brindado una visión completamente diferente de la vida y por ello, trato de ser mejor cada día. GRACIAS MI AMOR.

A MIS HERMANOS: JACKELINE JESSENIA y JOSÉ LUIS

Por su cariño, su compañía, su comprensión y por todas las palabras de aliento que no me dejaron desfallecer en los momentos difíciles de mi carrera. GRACIAS HERMANOS.

A MIS ABUELOS, TIOS, PRIMOS Y AMIGOS: Por acompañarme siempre y brindarme su apoyo emocional en todo momento.

A TODOS, CON MUCHO CARIÑO Y APRECIO,

WENDY ROCIO RIVERA LÓPEZ

RECONOCIMIENTO

Al SERVICIO NACIONAL DE ESTUDIOS TERRITORIALES (SNET), por haber facilitado la información requerida para desarrollar la presente investigación.

A la DRA. DINA LARIOS LÓPEZ, por el apoyo y colaboración, así como por su dedicación en el desarrollo de esta investigación.

Al DR. JUAN CARLOS INZUNZA, por su apoyo y colaboración, y por toda la información proporcionada para el marco teórico de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A mis asesores: LICDA. TELMA ELIZABETH JIMÉNEZ MURILLO y LIC. OSCAR ARMANDO CALDERÓN CASTELLANOS, por es esfuerzo y tiempo que dedicaron para guiarme y corregirme durante la elaboración de este trabajo.

A mí amigo: LIC. JUAN ERNESTO GÓMEZ y a su familia, por estar siempre disponible para brindarme su mano amiga, ofreciéndome palabras de aliento y comprensión en los momentos difíciles de mi carrera.

A mis amigos y docentes de la Sección de Física: LICDA. GLORIA ELIZABETH LARIOS DE NAVARRO; LICDA. MIRIAM RAMOS DE ROSALES, LIC. RAÚL ANTONIO ALFARO HERNÁNDEZ, LIC. RAFAEL CAYETANO CARTAGENA, y LIC. OSCAR REINALDO HERNÁNDEZ, por su compañía y guía durante el desarrollo de mi carrera.

Al Coordinador de Procesos de Graduación: LIC. ABEL MARTÍNEZ, por su paciencia y comprensión ante todas las adversidades que se presentaron y que fueron superadas durante la ejecución de esta investigación.

A mis amigos: LICDA. DIANA ELIZABETH JIMÉNEZ DE CONTRERAS y su familia, ING. ARNOLDO GRANADOS RIVAS, por brindarme apoyo, cariño y confianza.

A todos mis amigos y personas en general, que me brindaron palabras de alientos y que me acompañaron en los momentos más difíciles del desarrollo de este trabajo.

GRACIAS A TODOS...

TABLA DE CONTENIDOS

	No página
INDICE DE TABLAS	x
INDICE DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvi
 CAPITULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES	1
1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACION	3
1.4 HIPÓTESIS	4
1.4.1 Variables involucradas en el estudio	4
1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.5.1 Objetivos generales	5
1.5.2 Objetivos específicos	5
 CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO	
INTRODUCCIÓN	6
2.1 DEFINICIÓN DE TEMPERATURA	6
2.1.1 Medición de la temperatura	6
2.2 TEMPERATURAS EN MICROAMBIENTES	8
2.2.1 Calor y energía térmica	10
2.2.2 Flujo de calor sensible y latente	10
2.2.3 Capacidad calorífica, calor específico y calor sensible	11

2.2.4	Calor latente	12
2.2.5	Transferencia de calor	13
2.2.6	Variación diurna y anual de la temperatura del suelo a diferentes profundidades	18
2.3	EFFECTOS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO SUPERFICIAL Y CERCANO A LA SUPERFICIE Y DE LA CUBIERTA VEGETAL SOBRE LA TEMPERATURA DEL SUELO	27
2.3.1	Importancia biológica de la temperatura del suelo	28

CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO

	INTRODUCCIÓN	30
3.1	BASE DE DATOS	30
3.2	DATOS RELAVANTES DE LA ESTACION METEOROLÓGICA EN ESTUDIO	31
3.3	DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD	33
3.4	SOFTWARE ESTADISTICOS UTILIZADOS	34

CAPITULO 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

	INTRODUCCIÓN	35
4.1	ESTUDIO DE LA MARCHA MENSUAL Y ANUAL DE LA TEMPERATURA PARA CADA PROFUNDIDAD	35
4.1.1	Marcha anual de las variables en estudio	35
4.1.2	Marcha mensual de las variables en estudio	39
4.2	ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN DE LAS TEMPERATURAS	43
4.2.1	Correlación lineal de las variables en estudio para el período I (Estación seca I)	43
4.2.2	Correlación lineal de las variables en estudio para el período II (Estación lluviosa I)	45
4.2.3	Correlación lineal de las variables en estudio para el período III (Estación	48

seca II)

4.3	CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA DEL SUELO	52
-----	---	----

CAPITULO 5. CONCLISIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES	58
-----	--------------	----

5.2	RECOMENDACIONES	60
-----	-----------------	----

	BIBLIOGRAFÍA	61
--	--------------	----

	ANEXOS	63
--	--------	----

	GLOSARIO	86
--	----------	----

INDICE DE TABLAS

No
página

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Tabla 2.1.	Propiedades térmicas de materias representativas que se encuentran comúnmente en el entorno físico. Algunos valores y órdenes de magnitud típicos (unidades CGS). (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	17
------------	---	----

CAPITULO 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Tabla 4.1.	Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período I (estación seca I, del 01 de enero 2002 hasta el 17 de mayo 2002)	45
Tabla 4.2.	Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período II (estación lluviosa I, del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002)	47
Tabla 4.3.	Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período III (estación seca II, del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003)	51
Tabla 4.4.	Cálculo de la difusividad térmica de suelo a partir de los datos de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada mes del periodo de estudio. Las casillas marcadas con (*) indican que no se tenían valores disponibles para efectuar el cálculo.	55
Tabla 4.5.	Cálculo de la difusividad térmica de suelo a partir de los datos de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada período de estudio.	57

INDICE DE FIGURAS

No
página

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Fig. 2.1.	Termograma de Concepción de Chile. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	7
Fig. 2.2.	a) Termómetros de mínima y de máxima y, b) termógrafo	8
Fig. 2.3.	Temperatura del aire a 2 m sobre la superficie seca de un desierto, cerca del mediodía, medida con un termopar de 2.5 μm . (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	8
Fig. 2.4.	Esquema que muestra la forma de estimar el factor de corrección “d”	9
Fig. 2.5.	Perfil típico de temperatura durante el día trazado como una función de la altura (izquierda) y del logaritmo de la altura (derecha). El gráfico logarítmico muestra la extrapolación del perfil medido a $z = d = z_h$ para determinar la temperatura de la superficie. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	10
Fig. 2.6.	Conducción de calor entre dos caras de un bloque de suelo que se encuentran a diferentes temperaturas.	15
Fig. 2.7.	Perfiles de temperatura hipotéticas por encima y por debajo de la superficie del suelo en un día despejado y con el aire en calma. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	15
Fig. 2.8.	Una lámina delgada de suelo de área unitaria mostrando los flujos del sistema y el almacenamiento dentro del sistema de entrada y salida.	20
Fig. 2.9.	Comportamiento periódico de la temperatura para las profundidades $z = 0$ y $z = \pi D$	22
Fig. 2.10.	Forma general de una marcha diaria de temperatura. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	24
Fig. 2.11.	a) Gráfico tridimensional de la temperatura del suelo como función del tiempo y de la profundidad, mostrando la atenuación de la onda de temperatura con la profundidad y el retardamiento de la máxima y mínima a tiempos posteriores con el aumento de la profundidad, como es expresado por la ecuación 2.16 (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	24

Fig. 2.12.	Ciclo anual de la temperatura del suelo a distintas profundidades en la estación meteorológica Bellavista de la Universidad de Concepción, Chile. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)	25
------------	---	----

Fig. 2.13.	Balance radiativo de la Tierra. (http://es.wikipedia.org)	28
------------	---	----

CAPÍTULO 3. DISEÑO METODOLÓGICO

Fig. 3.1.	Ubicación geográfica de la estación meteorológica de El Papalón. Fuente: SNET	31
-----------	---	----

Fig. 3.2.	Mapa de uso de suelos correspondiente a 1970. Fuente: SNET	32
-----------	--	----

CAPITULO 4. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Fig. 4.1.	Marcha de las temperaturas del suelo a diferentes profundidades y del aire para el período completo de estudio, con base en promedios mensuales, correspondiente a la Hora I: 7:00 a.m.	36
-----------	---	----

Fig. 4.2.	Marcha de las temperaturas del suelo a diferentes profundidades y del aire para el período completo de estudio, con base en promedios mensuales, correspondiente a la Hora II: 2:00 p.m.	38
-----------	--	----

Fig. 4.3.	Comparación de las marchas de las temperaturas del suelo y del aire para los meses de febrero de 2002 y febrero de 2003 a la 2:00 p.m.	39
-----------	--	----

Fig. 4.4.	Marcha de las temperaturas del suelo, a diferentes profundidades, y del aire para las 2:00 p.m. durante mayo de 2002. Este mes corresponde al período de transición entre la estación seca-lluviosa para este año.	40
-----------	--	----

Fig. 4.5.	Marcha diaria de las temperaturas en estudio correspondiente a enero de 2002, para las horas de registro a) 7:00 a.m., b) 2:00 p.m. y c) 9:00 p.m.	41
-----------	--	----

Fig. 4.6.	Marcha diaria de la temperatura correspondiente al mes de abril de 2003 para todo el periodo de estudio, para las horas de registro 7:00 a.m., 2:00 p.m. y 9:00 p.m. por cada profundidad (a) 2 cm, b) 5 cm, c) 10 cm, d) 20 cm y e) temperatura del aire.	42
-----------	--	----

Fig. 4.7.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	43
-----------	---	----

Fig. 4.8.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo I (de 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su	44
-----------	---	----

respectivo coeficiente de correlación.

Fig. 4.9.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el período I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	44
Fig. 4.10.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo II (del 18 de mayo hasta el 08 noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	46
Fig. 4.11.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo II (del 18 de mayo hasta el 08 noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	46
Fig. 4.12.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el período II (del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	47
Fig. 4.13.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	48
Fig. 4.14.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	49
Fig. 4.15.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 10.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	49
Fig. 4.16.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	50
Fig. 4.17.	Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 10.0 cm de profundidad para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.	50

- Fig. 4.18. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 10.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 20.0 cm de profundidad para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación. 51
- Fig. 4.19. Comportamiento de la difusividad térmica del suelo en función del tiempo, calculada a partir de valores de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada mes del período de estudio completo (del 01 de enero de 2002 hasta el 30 de abril de 2003) 56

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados del estudio del flujo de calor a través del suelo y su relación térmica con la atmósfera. Se encontró que la temperatura del suelo en sus diferentes capas está determinada por las características físicas de suelo y se ve afectada considerablemente por el intercambio térmico que realiza con la atmósfera. Este efecto es más evidente en las capas superficiales y depende de la hora del día y de la época del año.

En el estudio de las marchas de temperatura se aprecia un desfase de dos meses entre los valores extremos de temperatura (máximos y mínimos) del aire y del suelo en su capa de mayor profundidad. Es de especial interés lo que sucede en los periodos de transición entre las épocas seca-lluviosa y viceversa, donde las variaciones de la humedad en la atmósfera y en el suelo modifican considerablemente la marcha de la temperatura del suelo en todas sus capas.

El estudio de correlación lineal aplicado a las variables en estudio muestra que existe una fuerte relación de dependencia lineal entre la temperatura del aire y la temperatura de las capas superficiales del suelo (2.0 cm y 5.0 cm). El mismo resultado se aprecia entre la temperatura de la capa a 2.0 cm y la capa a 5.0 cm de profundidad. Esto se observa a lo largo de todo el periodo de estudio.

Para caracterizar las propiedades físicas del suelo, se calculó su difusividad térmica K . El resultado promedio para todo el periodo de estudio (16 meses) es de $(0.22 \pm 0.04) \text{ cm}^2/\text{s}$. Se observa que esta magnitud tiene un comportamiento sinusoidal, con un periodo de 4 meses. Por época, los valores de la difusividad térmica tienen una dispersión considerable respecto al valor promedio para todo el periodo de estudio. Se observa que para época seca I, el valor promedio es de $0.2571 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 17.2%; para la época lluviosa I, su valor promedio es $0.2066 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.8%; y para la época seca II, tiene un valor promedio de $0.2071 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.6%.

INTRODUCCION

Es evidente que la densidad demográfica está fuertemente relacionada con muchos de los aspectos que modifican los microclimas y los climas regionales; estas modificaciones están asociadas a los cambios de las condiciones climáticas globales del planeta.

En el caso especial de El Salvador, con una extensión territorial de 21.041 km², únicamente el 0,20% (2000) de la superficie ha sido declarada espacio protegido. El país tiene una de las tasas de más altas de deforestación anual del mundo, correspondiente al 4,56% (1990–2000). El elevado porcentaje de bosques primarios que han desaparecido a lo largo de los años ha provocado una mala calidad del agua y la erosión del suelo, sobre todo en terrenos empinados y en suelos poco profundos. La contaminación del agua y del suelo con pesticidas y vertidos tóxicos se ha convertido, asimismo, en un serio problema. La elevada densidad demográfica del país, 318 habitante/km², que demanda el incremento de urbanizaciones y genera pérdidas de suelo e incremento de la erosión por los cambios de usos que son muy acelerados en el país (Enciclopedia Encarta 2005).

Por su ubicación geográfica, dinámica natural y territorial, El Salvador ha estado expuesto históricamente a diferentes amenazas de origen natural, las que sumadas a los procesos sociales de transformación como deforestación y cambios de uso del suelo, propician condiciones de riesgo y plantean altas posibilidades de ocurrencia de desastres.

A pesar esto, las investigaciones que se desarrollan en las áreas de Ciencias de la Tierra, específicamente en meteorología y climatología, son muy limitadas debido en parte al reducido número de profesionales especialistas y, por otro lado a la poca disponibilidad de recursos financieros asignados por las instituciones.

La finalidad de la presente investigación fue analizar el intercambio térmico de energía entre la atmósfera y el suelo, así como los mecanismos de transferencia de calor a través del suelo. Para lograr esto, se buscó de manera estadística, la relación de dependencia lineal entre la temperatura del aire y la temperatura del suelo a diferentes profundidades, así con la relación de dependencia entre las temperaturas del suelo en sus diferentes capas.

Otro de los aspectos fundamentales en este estudio ha sido la caracterización del suelo a través del cálculo de la difusividad térmica. Para esto se utilizó un modelo teórico que usa datos de temperatura a diferentes profundidades.

Para el desarrollo de este trabajo se utilizó una base de datos de temperatura proporcionada por El Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). Esta base de datos consta registros ininterrumpidos de temperatura en el aire a un metro sobre la superficie, y en el suelo a diferentes profundidades (2.0 cm, 5.0 cm, 10.0 cm y 20.0 cm). Los registros se realizaron a diferentes horas durante el día (7:00 a.m., 2:00 p.m. y 9:00 p.m) en la Estación Meteorológica de El Papalón para un período 16 meses, desde enero de 2002 hasta abril 2003. También, se tomó en cuenta el registro de precipitación para el mismo período, con el objetivo de identificar las etapas seca y lluviosa presentes en el período estudiado, pero esta variable no fue incluida en el análisis.

Se espera que los resultados presentados en este informe sean de provecho para la población salvadoreña en general, y especialmente para los profesionales dedicados al quehacer investigativo afín ésta área científica; pero más aún a los sectores dedicados a la agricultura, ya que el comportamiento térmico del factor “suelo” afecta directamente la producción agrícola del país. A saber, la alteración de su temperatura media repercutiría negativamente sobre la economía familiar y además pondría en riesgo la seguridad alimentaria de la población en general.

Este documento está estructurado en 5 capítulos. En el capítulo 1 se presenta una breve descripción de los aspectos que anteceden a éste trabajo, además se presenta el planteamiento del problema y se hace un detalle de los objetivos que se perseguían con el desarrollo de esta investigación así como su importancia. En el capítulo 2 se presentan los conceptos teóricos básicos relacionados con el tema de investigación, y se describe el modelo físico empleado para el análisis de las variables estudiadas. En el capítulo 3 se describen los procedimientos utilizados para efectuar el análisis de los datos. En el capítulo 4 se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos de temperatura, así como la interpretación y discusión de ellos. El capítulo 5 corresponde al de las conclusiones obtenidas de la interpretación y discusión de los resultados, además, se presenta una serie de recomendaciones pertinentes sobre el desarrollo futuro de nuevas investigaciones en esta área científica.

CAPÍTULO 1

PLATEAMIENTO DEL PROBLEMA

INTRODUCCIÓN

La importancia de esta investigación radica en que el factor “suelo” afecta directamente la producción agrícola del país, por lo que la alteración de su temperatura media repercutiría negativamente sobre la economía familiar de los sectores dedicados a la agricultura, además de poner en riesgo la seguridad alimentaria de la población en general. En este capítulo se hace énfasis en los antecedentes que existen en nuestro país sobre el uso de los suelos y su relación con la temperatura del aire, planteando posteriormente la definición del problema así como los objetivos que guían la ejecución de esta investigación.

1.1 ANTECEDENTES

Existen a la fecha muy pocos estudios alrededor del tema, siendo el estudio de la temperatura del suelo un tema muy relevante para el país, así como su distribución temporal y espacial ya que como se dijo anteriormente repercute en la agricultura y en general para el uso del suelo. Sin embargo, no existen estudios climatológicos sobre la temperatura de los suelos en El Salvador.

En El Salvador como en otros países, la deforestación, las técnicas inapropiadas de uso del suelo y la construcción en lugares inadecuados contribuyen a la degradación ambiental, lo que causa una disminución de la infiltración del agua; es decir, al reducirse la protección vegetal no existe moderación del impacto de lluvia y ésta cae directamente sobre el suelo, donde se desplaza con rapidez y no hay suficiente tiempo de remanencia del agua en el suelo y la posibilidad de infiltración se ve disminuida. La energía del sol que llega al suelo también se ve alterada por la deforestación, así mismo por la modificación en su uso, la cual en El Salvador es muy acelerada.

Entre los estudios que se relacionan con la investigación se encontraron:

“Prospección de Flujo de calor del Campo Geotérmico de Chipilapa”. Flujo de Calor Conductivo, realizado por: Larios López y Campos Romero, Superintendencia de Recursos

Geotérmicos, CEL. 1983. Dicho estudio incluye, mediciones de flujo de calor conductivo y el comportamiento de la temperatura con la humedad del suelo, entre otros factores.

Además, en el año 1998 fue desarrollado el estudio “*Escenarios Climáticos de Referencia para la República de El Salvador* (Centella, A.,L . Castillo y A. Aguilar), en el cual una de las conclusiones más relevantes indicaba que durante el periodo de 1961 a 1990, la temperatura superficial del aire en el país, presentó una tendencia significativa hacia el incremento de sus magnitudes anuales.

Durante el año 2005, Telma Elizabeth Jiménez Murillo, realizó un estudio en *Tendencias del clima en El Salvador*, encontrando para la temperatura del aire anual una tendencia positiva estadísticamente fuerte.

Y finalmente se encontró el estudio realizado por Adriana María Erazo Chica, Investigadora Hidróloga, Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET en su estudio *Variaciones Hidroclimáticas o Evidencias de Cambio Climático en El Salvador*, Los resultados de su estudio indican de la misma manera que los estudios anteriores una tendencia al incremento de la temperatura en el país, siendo el Papalón una de las dos estaciones que presentaba mayor incremento de las temperatura.

1.2 ENUNCIADO DEL PROBLEMA

Investigaciones recientes muestran una tendencia al alza en la temperatura superficial de la Tierra (temperatura del aire). Puesto que el suelo intercambia calor con la atmósfera, lógicamente, de incrementarse la temperatura del aire, la temperatura del suelo puede igualmente presentar un aumento. La determinación teórica y experimental de este hecho es de trascendental importancia para el país, por cuanto la temperatura aumentada del suelo se traduce en menor aprovechamiento de la humedad del mismo por las plantas, y mayores limitaciones en su crecimiento; asimismo, mayor susceptibilidad a la prolongada ausencia de lluvias, que en el caso de El Salvador, y en especial de la Región Oriental del país, se produce durante la así llamada “canícula”. Es importante estudiar como se transfiere el calor a través del suelo; por lo tanto se deben conocer

las propiedades relacionadas con esta transferencia de calor, es decir conocer las propiedades físicas que se encuentran involucradas en dicha transferencia de calor.

El problema que aborda la presente investigación, puede enunciarse como sigue:

“Estudio de los mecanismos de transferencia de calor a través del suelo, y correlación de la temperatura del mismo con la temperatura ambiente para la estación meteorológica de El Papalón, en San Miguel, tanto para la estación seca como para la estación lluviosa “

El período utilizado para el presente estudio comprende dieciséis meses, desde enero de 2002 hasta abril de 2003, de los cuales hay registros ininterrumpidos de datos diarios de las variables seleccionadas, de la estación meteorológica de El Papalón

1.3 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, en El Salvador un aspecto poco considerado al estudiar la climatología es la caracterización de la temperatura del suelo y otras variables relacionadas (Humedad Relativa, Precipitación, etc.). Por todo lo expuesto anteriormente, se establece la importancia para el país de realizar estudios del factor “suelo”, ya que es un área sobre la cual no se han realizado muchas investigaciones, contando con información relevante para poder iniciar dicho estudio. En esta investigación se hará uso de información disponible para una de las estaciones meteorológicas de la red meteorológica nacional, la estación de El Papalón. Se pretende estudiar la relación que existe entre la temperatura del aire y la del suelo, con miras a generar elementos que permita evaluar la dimensión del impacto que el cambio en la temperatura del aire pueda tener sobre el suelo. Los resultados de esta investigación serán de provecho para los investigadores y estudiosos del tema, así como para la población salvadoreña en general.

Dentro de esta perspectiva, un sector importante de los estudiosos del tema están convencidos de que los efectos del calentamiento global y el cambio climático ya empezaron a sentirse en algunas regiones del planeta, y que los fenómenos naturales catastróficos ocurridos con inusual frecuencia, así como las anomalías climáticas que se multiplican por todo el planeta, son consecuencia de este cambio climático. De acuerdo con esto, el planeta se encuentra al inicio de un proceso de calentamiento global debido al incremento de la concentración de gases

invernadero y el consiguiente aumento del efecto invernadero. A este calentamiento global de origen antropogénico previsto por los científicos afectará –o está afectando a todo el planeta, por lo que El Salvador esta siendo también afectado por el aumento de la temperatura superficial debido a la modificación del uso del suelo, el cual es muy acelerado en el país.

1.4 HIPÓTESIS

La relación de dependencia que existe entre la temperatura del suelo respecto a la temperatura ambiente es de proporcionalidad directa.

1.4.1 Variables involucradas en el estudio

Las principales variables involucradas en el fenómeno a estudiar son:

- a) La temperatura del aire (T_A)
- b) La humedad relativa (del aire, HR)
- c) La temperatura de suelo (T_S)
- d) La humedad del suelo
- e) La profundidad de medida en el suelo
- f) La radiación solar
- g) Las características asociadas al tipo de suelo (difusividad, conductividad, calor específico)
- h) La precipitación

De estas variables, en esta investigación, se limitará a correlacionar la “temperatura del aire”, “temperatura de suelo” a diferentes profundidades de medida (2.0 cm, 5.0 cm, 10.0 cm, 20.0 cm). Se separaran para periodo seco y periodo lluvioso, y así se considera la humedad.

1.5 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1 Objetivos generales

1. Analizar datos históricos de temperatura de suelo y temperatura del aire a diferentes profundidades de la estación meteorológica de El Papalón y correlacionarlos entre si para la época seca y lluviosa por separado
2. Evaluar los mecanismos de transferencia de calor que intervienen en la temperatura del suelo y correlacionar dichos mecanismos con las variaciones de la temperatura ambiente.

1.5.2 Objetivos específicos

1. Usando los datos históricos de temperatura de aire y suelo de la estación meteorológica de El Papalón, determinar el comportamiento promedio de las variables para conocer los ciclos estacionales, mensuales y diarios, para el periodo de enero de 2002 hasta abril 2003
2. Establecer las marchas diarias de la temperatura del aire y del suelo.
3. Establecer las periodicidades y el desfase entre las variables en estudio
4. Correlacionar estadísticamente la temperatura del suelo y la del aire para la estación en estudio sobre bases diarias y mensuales para cuatro profundidades, separando la estación seca y la estación lluviosa
5. Determinar la difusividad del suelo, usando un modelo que utilice la información disponible.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan las leyes fundamentales que gobiernan el comportamiento de la temperatura; además, se aplican estos conceptos básicos para interpretar y describir la transmisión de calor a través del suelo, fenómeno que es de mucha importancia en las actividades agrícolas y forestales, así como de la temperatura del aire

2.1 DEFINICIÓN DE TEMPERATURA

Para comprender el concepto de temperatura se debe establecer primero, la definición de los conceptos siguientes: 1) *contacto térmico* es cuando entre dos cuerpos puede ocurrir un intercambio de energía sin que se realice trabajo macroscópico, y 2) *equilibrio térmico* es un estado en el que dos cuerpos en contacto térmico, dejan de tener todo intercambio neto de energía. El tiempo que tardan los cuerpos en alcanzar el equilibrio térmico depende de las propiedades de los mismos. Así que se puede pensar en la *temperatura* como una propiedad que determina cuando un cuerpo se encuentra o no en equilibrio térmico con otros cuerpos. Esta definición esta basada en el *principio cero de la termodinámica*: “Si dos cuerpos A y B están por separado en equilibrio térmico con un tercer cuerpo C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre sí”.

2.1.1 Medición de la temperatura

Los cambios de temperatura se miden a partir de los cambios en las otras propiedades de una sustancia, con un instrumento llamado *termómetro*, de los cuales existen varios tipos. El termómetro mecánico se basa en la propiedad de dilatación con el calor o contracción con el frío de alguna sustancia. Por ejemplo, el termómetro de mercurio convencional mide la dilatación de una columna de mercurio en un capilar de vidrio, ya que el cambio de longitud de la columna está

relacionado con el cambio de temperatura. En meteorología se distinguen los siguientes medidores de temperatura:

- a) *Termómetro de mercurio* para medir temperaturas en el rango que se encuentran comúnmente en la atmósfera.
- b) *Termómetro de máxima* para medir la máxima diaria, es de mercurio. Los termómetros que miden la temperatura del cuerpo son de máxima.
- c) *Termómetro de mínima* para medir la mínima diaria. Como el mercurio se congela a -39°C , para asegurarse de medir temperaturas menores que estas, se usan los termómetros de alcohol, el que se congela a -130°C . Estos termómetros se muestran en la figura 2.2a.
- d) *Termógrafo*: instrumento que registra en forma continua la temperatura, se muestra en la figura 2.2b; el registro se llama termograma. La medición de temperatura se realiza a través de un elemento sensible bimetalico que está conectado a un sistema de transmisión y amplificación que posee un brazo inscriptor, con una plumón de tinta en su extremo registrando los cambios de temperatura sobre el termograma. Un ejemplo de este registro semanal para Concepción de Chile, se muestra en la figura 2.1.

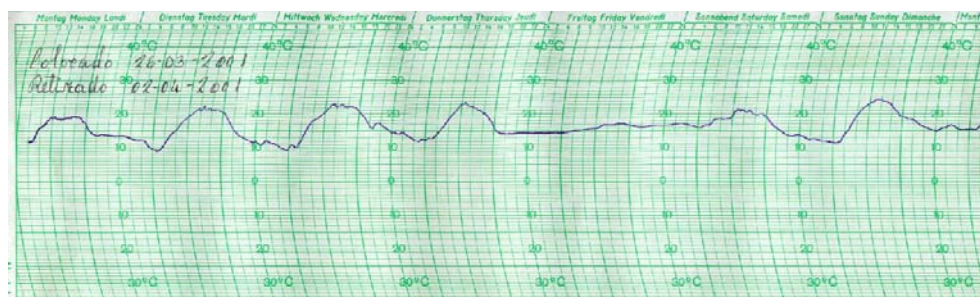


Fig. 2.1. Termograma de Concepción de Chile (*Principios de microclimatología*. Inzunza, J. 2002)

Se sabe también que si se suministra calor a un gas ideal contenido en un recipiente de volumen constante, la presión aumenta, y el cambio de temperatura puede determinarse a partir del cambio en la presión. También existen termómetros eléctricos, basados en cambios del flujo de corriente con las variaciones de temperatura, llamados termistores. Estos se usan comúnmente en las radiosondas, que se lanzan con globos para realizar mediciones de temperatura en la vertical.

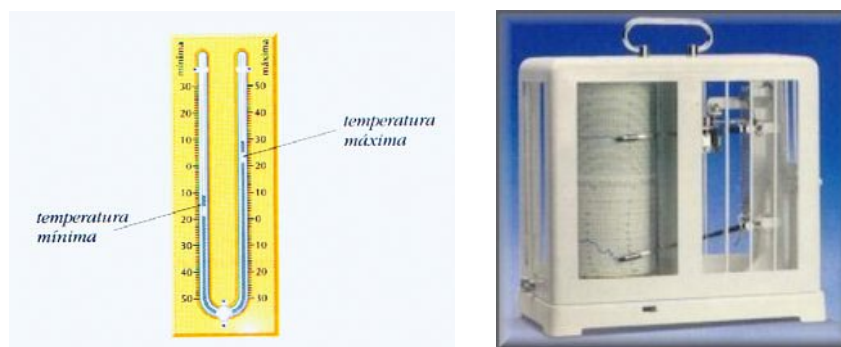


Fig 2.2. a) Termómetros de mínima y de máxima y, b) termógrafo

2.2 TEMPERATURAS EN MICROAMBIENTES

Las temperaturas en los microclimas, donde viven los organismos vivos, son generalmente diferentes a las temperaturas del aire medidas en las estaciones meteorológicas, reportadas en el pronóstico del tiempo realizado por los centros de pronóstico meteorológico.

La transferencia de calor en el aire es producida por convección de masas de aire caliente o frío, por lo tanto la temperatura en cualquier punto del aire es muy diferente a la temperatura media del aire medida con un termómetro corriente, como se observa en la figura 2.3, donde se muestran las variaciones de temperatura con un termómetro de termopar de $2.5 \mu\text{m}$ de diámetro.

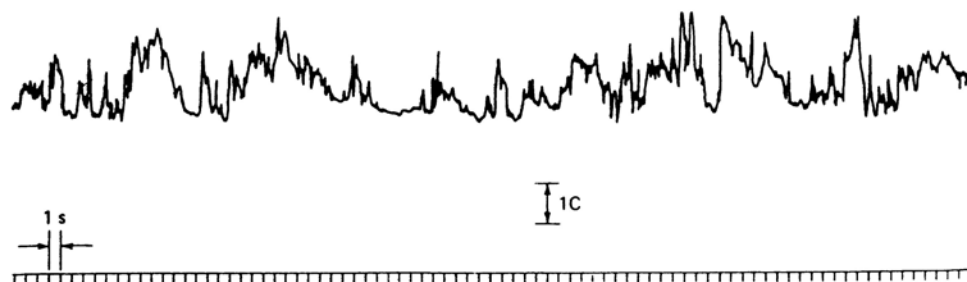


Fig. 2.3. Temperatura del aire a 2 m sobre la superficie seca de un desierto, cerca del mediodía, medida con un termopar de $2.5 \mu\text{m}$ (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002).

Las fluctuaciones de temperatura en la atmósfera producen un gran número de fenómenos naturales, como el titilar de las estrellas o el centelleo de las luces en la noche, debido al índice de refracción de la atmósfera, que es afectado por la temperatura del aire. Las masas de aire frío y caliente forman un patrón de difracción que es barrido por el viento. De esta forma, al mirar a una

ciudad en noches despejadas desde lejos, se pueden ver los cambios en el centelleo de las luces.

La teoría del transporte turbulento, proporciona una expresión que permite calcular la temperatura media del aire sobre una superficie uniforme en estado estacionario, mediante la siguiente ecuación empírica:

$$T_m = T_o - \frac{H}{\rho c (k^*) (u^*)} \ln \left(\frac{z + z_h - d}{z_h} \right) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

- T_m es la temperatura media del aire a una altura z ,
- T_o es la temperatura en la superficie de intercambio o aerodinámica superficial aparente $z = d$,
- z_h se llama parámetro de rugosidad para la transferencia de calor, que se puede calcular como $z_h = 0.2(0.13h) = 0.026h$,
- H es el flujo de calor sensible,
- ρ y c son la densidad y el calor específico del aire, tal que $\rho c = 1200 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$,
- k^* se llama constante de Von Karman, su valor es ≈ 0.4 , y
- u^* se llama velocidad de fricción, que es un parámetro que relaciona la rapidez del viento con la rugosidad de la superficie,
- d es un factor de corrección, que para una superficie plana es $d = 0$ y para un cultivo, d se estima como $d = 0.64h$ con h igual a la altura del cultivo en metros, como se ve en la figura 2.4.

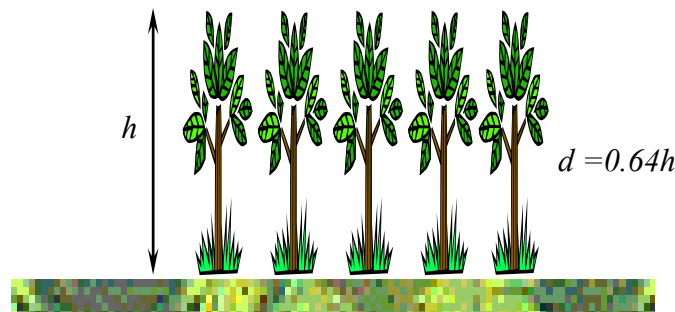


Fig. 2.4. Esquema que muestra la forma de estimar el factor de corrección “d”

La figura 2.5 muestra un perfil típico de temperatura durante el día en función de la altura z y graficado como función de $\ln(z + z_h - d)$; en este gráfico al extrapolar la recta hasta $\ln(z_h)$ se puede obtener la temperatura media T_o en superficie.

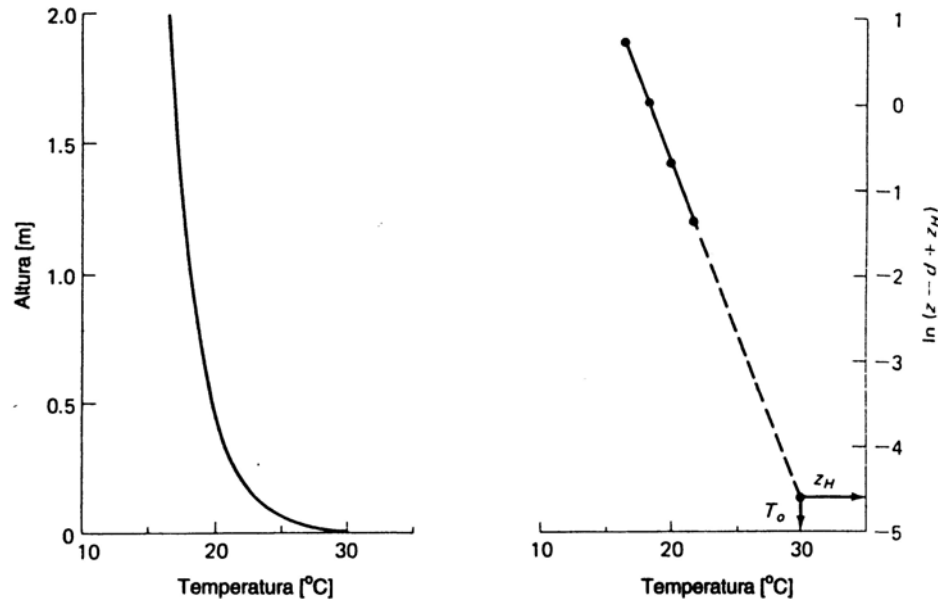


Fig. 2.5. Perfil típico de temperatura durante el día trazado como una función de la altura (izquierda) y del logaritmo de la altura (derecha). El gráfico logarítmico muestra la extrapolación del perfil medido a $z = d = z_h$ para determinar la temperatura de la superficie. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)

2.2.1 Calor y energía térmica

La palabra **calor** se debe usar sólo cuando se describe la energía que se transfiere de un lugar a otro. El **Flujo de calor** es la transferencia de energía que se lleva a cabo como consecuencia de las diferencias en la temperatura solamente. La **energía interna** es la energía que tiene un cuerpo debido a su temperatura. En la escala microscópica, la energía interna de una sustancia es energía cinética de vibración y, mientras más grande es la temperatura de la sustancia, mayor es su energía interna.

2.2.2 Flujo de calor sensible y latente

Si se pone al fuego un vaso con agua fría, la temperatura del agua aumentará; este calor que

produce el cambio de temperatura se llama **calor sensible**. Se puede seguir entregando calor hasta que el agua hierva; cuando esto ocurre no aumenta más la temperatura y el calor entregado se emplea en evaporar el agua. Este calor ya no está presente como calor sensible, se llama **calor latente** (de evaporación). Este calor puede ser posteriormente recuperado como calor sensible si el vapor se condensa.

Otro ejemplo es: si se pone en una habitación cálida un vaso con hielo, su temperatura aumentará, pero cesará cuando se alcance el punto de fusión, manteniéndose en este punto fijo la temperatura en 0°C hasta que se derrita todo el hielo. El calor empleado durante la fusión es el calor latente (de fusión) y se puede recuperar como calor sensible si el agua se congela.

Si no hay **cambio de fase** se tiene calor sensible; la ganancia o pérdida de calor en los cambios de fase se llama calor latente (de fusión, vaporización, condensación, etc.). En la atmósfera continuamente se encuentran procesos de evaporación y condensación en la formación de nubes y procesos de fusión ligados a la formación de cristales de hielo, nieve y granizo.

2.2.3 Capacidad calorífica, calor específico y calor sensible

La cantidad de calor que se comunica a un cuerpo se puede expresarse en varias unidades, pero en la actualidad se utiliza preferentemente la unidad de Sistema Internacional: el Joule (J). También suele usarse la caloría (cal), que se define como la cantidad de calor que se necesita para elevar la temperatura de un gramo de agua en 1°C , desde 14.5°C a 15.5°C . Una caloría es igual a 4.186 J.

Si se entrega calor en la misma cantidad a masas iguales de distintas sustancias, los aumentos de temperatura son diferentes. Por ejemplo, si se entrega una caloría a un gramo de plata, la elevación de temperatura será mayor (10°C) que en el caso de un gramo de agua (1°C). Se dice que las sustancias tienen diferentes **calores específicos**. Si se entregan calorías a un gramo de una sustancia y la temperatura aumenta en T , entonces ambas magnitudes están relacionadas por un factor C que es la capacidad calorífica, esto es: *la capacidad calorífica C de cualquier sustancia se define como la cantidad de energía calorífica que se requiere para elevar su temperatura en un grado Celsius*. Si se agrega Q unidades de calor a un cuerpo que le produce un cambio de temperatura ΔT , entonces:

$$Q = C\Delta T \quad (\text{Ec. 2.2})$$

La capacidad calorífica de un cuerpo es proporcional a su masa. Por esto, es conveniente definir la capacidad calorífica por unidad de masa, c , llamada **calor específico**,

$$c = \frac{C}{m} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Donde m representa a la masa de la muestra. Las unidades de medida son: C (J/K) y c (J/kg.K). También se puede escribir la capacidad calorífica volumétrica, $C/V = \rho c$ (en J/m³.K). Próximamente se verá como los cambios de temperatura están relacionados con la capacidad calorífica y la conductividad de la tierra y de la atmósfera.

Combinando las ecuaciones 2.2 y 2.3 se puede expresar el **calor sensible** Q o la energía calorífica transferida entre un cuerpo de masa m y los alrededores para un cambio de temperatura como

$$Q = mc\Delta T \quad (\text{Ec. 2.4})$$

2.2.4 Calor latente

Una sustancia experimenta un cambio en su temperatura cuando se transfiere calor entre la sustancia y los alrededores. Pero existen situaciones donde el flujo de calor no tiene como resultado un cambio en la temperatura. Esto ocurre siempre que las características físicas de la sustancia cambien de una forma a otra, lo que se conoce como **cambio de fase**. Algunos cambios de fase comunes son sólido a líquido (fusión) y líquido a gas (ebullición). Todos estos cambios de fase implican un cambio en la energía interna de la sustancia. La energía requerida se conoce como **calor de transformación**. Cuando un sistema sufre un cambio de fase, debe haber una transferencia de calor. Si L es el **calor latente** del cambio de fase, necesario para que una unidad de masa (m) cambie de fase, entonces el calor absorbido durante el cambio de estado es

$$Q = \pm mL \quad (\text{Ec. 2.5})$$

L depende de la naturaleza del cambio de fase, así como de las propiedades de la sustancia. El calor de fusión L_f se usa cuando el cambio de fase es de sólido a líquido, y el calor de

vaporización L_v es el calor latente correspondiente al cambio de fase de líquido a gas. En cada caso, para los cambios de fase en sentido opuesto se tienen el calor de solidificación y el calor de condensación. L se mide en J/kg.

2.2.5 Transferencia de calor

Es importante saber con que rapidez se transfiere el calor entre el sistema y sus alrededores y conocer sobre los mecanismos de transferencia de calor.

Radiación. Todos los cuerpos irradian energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas y, la rapidez con la cual un cuerpo emite energía radiante esta dada por la ley de Stefan-Boltzmann

$$H = \frac{dQ}{dt} = \sigma A e T^4 \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

- $H = \frac{dQ}{dt}$ es la potencia en W radiada por un cuerpo,
- σ es la constante de Stefan-Boltzmann, igual a $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$,
- A es el área de la superficie del objeto en metros cuadrados,
- e es la constante de emisividad, y
- T es la temperatura en la superficie en K.

El valor de la emisividad puede variar entre cero y la unidad, dependiendo de la superficie del objeto. La emisividad es igual a la fracción de la radiación incidente que la superficie absorbe.

Convección. Es un proceso de transferencia de calor en el cual la sustancia calentada se mueve de un lugar a otro. Por ejemplo si una capa de aire o agua se calienta, su densidad disminuye, se expande y se eleva. Esta masa caliente transfiere calor al medio circundante por convección, que puede ser natural o forzada (por ejemplo aire caliente movido por un ventilador).

Conducción. Este es el mecanismo de interés para la presente investigación, en particular, la conducción de calor en el suelo, es decir la transferencia de calor desde la superficie hacia el interior del suelo. En este proceso la transferencia de calor se produce a escala atómica como un intercambio de energía cinética entre las moléculas, donde las partículas menos energéticas ganan energía al chocar con las más energéticas.

La conducción de calor en el aire quieto es similar a la transferencia de momentum. Si el aire está más caliente que el suelo, la transferencia de calor es desde el aire cálido hacia el suelo más frío y viceversa. La conducción de calor sólo ocurre si hay diferencias de temperatura entre dos partes del medio conductor. Para un volumen de espesor dx , con área de sección transversal A y cuyas caras opuestas se encuentran a diferentes T_1 y T_2 , con $T_2 > T_1$, se encuentra que el calor dQ transferido en un tiempo dt fluye del extremo caliente al frío. Si se llama H (en W) al calor transferido por unidad de tiempo, la rapidez de transferencia de calor H , está dada por la ley de la conducción de calor de Fourier:

$$H = \frac{dQ}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Donde:

- k (en W/m.K) se llama **conductividad térmica** del material, magnitud que representa la capacidad con la cual la sustancia conduce calor y produce la consiguiente variación de temperatura; y
- $\frac{dT}{dx}$ es el gradiente de temperatura.

El signo menos indica que la conducción de calor es en la dirección decreciente de la temperatura, desde el aire cálido a una superficie fría, como se muestra en la figuras 2.6 y 2.7.

El suelo no es un verdadero sólido, sino que consta de partículas individuales y agregados, junto con aire, agua o hielo. La conductividad de un bloque de suelo (figura 2.6) no es constante, sigue la secuencia *mineral* > *agua* > *aire*, y depende de varios factores como:

- a) La conductividad de las partículas del material del suelo;
- b) El tamaño de las partículas del suelo;

- c) La compactación de la mezcla, es decir la porosidad y el grado de contacto entre partículas;
- d) La humedad del suelo.

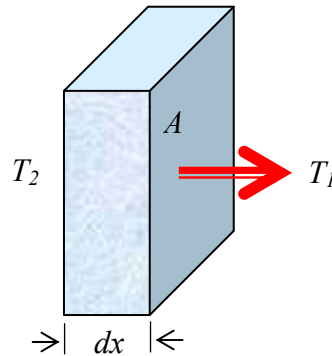


Fig. 2.6. Conducción de calor entre dos caras de un bloque de suelo que se encuentran a diferentes temperaturas.

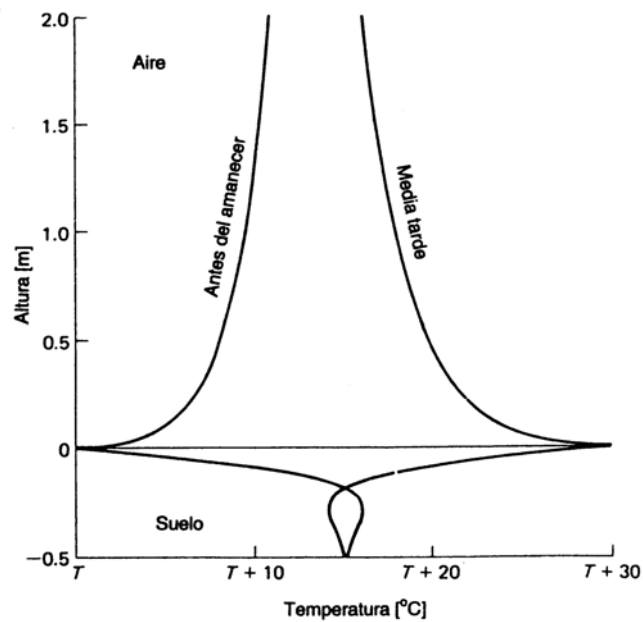


Fig. 2.7. Perfiles de temperatura hipotéticos por encima y por debajo de la superficie del suelo en un día despejado y con el aire en calma. (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)

Si la superficie del suelo se calienta, su temperatura aumenta y se transfiere calor hacia el interior por conducción. Como cada capa recibe calor, su temperatura aumenta, pero el punto hasta el cual aumenta depende de la capacidad calorífica de la unidad de volumen del suelo, lo que a su

vez depende del calor específico del material.

El agua tiene el calor específico más alto de las sustancias comunes, por lo que el aumento de temperatura será menor que para igual volumen de cualquier otro material. Esto significa que el calor específico de un volumen de suelo aumenta con el contenido de agua. También varía con la densidad del suelo. El calor específico grande del agua es responsable de las temperaturas moderadas que se encuentran en regiones cercanas a grandes masas de agua. Por ejemplo, al descender la temperatura de la masa de aire en el invierno, se transfiere calor del agua al aire, el cual a su vez transporta calor hacia la tierra si los vientos son favorables.

En agricultura, son los cambios de temperatura más que el flujo de calor los que tienen gran importancia para las partes subterráneas de las plantas, y esto se haya determinado por la *difusividad térmica*

$$K = \frac{k}{\rho c} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

- K es la difusividad térmica, cuyas dimensiones son m^2/s . Este concepto surge en muchas ramas de la física y la meteorología.
- k es la conductividad térmica
- c es el calor específico, y ρ es la densidad. Para el aire $c = 0.24 \text{ cal/g.C}^\circ$ y $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$.

Antes de examinar las variaciones de la temperatura en una capa del suelo, se deben hacer algunos comentarios sobre las diversas propiedades físicas que se relacionan con la conductividad térmica (k) y que se analizan a continuación. Los valores típicos de las diversas propiedades físicas están dados en la tabla 2.1.

Una observación atenta de la tabla 2.1 revela que para materiales medioambientales ordinarios k tiene una variación amplia, k varía de 1 a 2×10^{-2} unidades CGS para materiales rocosos; de 4 a 8×10^{-3} para constituyentes minerales del suelo; es del orden de 10^{-4} para materia orgánica seca; es del orden de 10^{-4} a 10^{-5} para sustancias que contienen gran cantidad de aire (como la nieve nueva seca). Por el contrario, el calor específico de los materiales del suelo se encuentra dentro

de la mitad de la escala de 0,1 a 1,0 cal/cm³.C°. La difusividad térmica K es del orden de los 10⁻² cm²/s para constituyentes minerales del suelo, y de 3 a 8×10⁻³ cm²/s para suelos típicos, aunque si el contenido de agua es muy alto, la cifra está más cerca de 10⁻³ cm²/s.

Tabla 2.1. Propiedades térmicas de materias representativas que se encuentran comúnmente en el entorno físico. Algunos valores y órdenes de magnitud típicos (unidades CGS). (*Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002*)

Materiales	k (cal/s.cm.C°)	ρ (g/cm³)	c (cal/ g.C°)	ρc (cal/cm³.C°)	K (cm²/s)
Cuarzo	0,021	2,66	0,19	0,51	0,042
Granito	0,011	2,6	0,2	0,52	0,0192
Mineral arcilloso	0,007	2,65	0,24	0,64	0,011
Hielo	0,0055	0,9	0,51	0,45	0,0122
Arena mojada	0,004	1,6	0,3	0,48	0,008
Suelo cenagoso húmedo	0,002	0,9	0,8	0,70	0,003
Agua estancada	0,0015	1,0	1,0	1,0	0,0015
Nieve vieja	0,0007	<0,5	0,51	0,22	0,0032
Materia orgánica	0,0006	1,30	0,46	0,59	0,0010
Arena seca	0,0004	1,4	0,2	0,3	0,0013
Madera	0,00035	0,6	0,3	0,18	0,0018
Nieve nueva	0,0002	0,1	0,5	0,05	0,0040
Suelo de turba	0,00015	0,3	0,44	0,10	0,0015
Aire inmóvil	0,00005	0,001	0,24	0,00024	0,208
<u>Aire agitado</u>					
• Muy estable	—	—	—	—	1,0×10 ³
• Neutral	—	—	—	—	1,0×10 ⁵
• Muy inestable	—	—	—	—	1,0×10 ⁷

Es de notar que la difusividad del aire es relativamente alta aún cuando éste se encuentre en calma (principalmente debido a su bajo calor específico). Cuando está en movimiento la difusividad aumenta en muchos órdenes de magnitud, esto sucede debido a que la conducción molecular ha sido reemplazada por intercambio convectivo (turbulento). Los datos denotan el importante papel que juega el agua en el suelo. La conductividad térmica se ve afectada ya que el

calor específico de una masa de suelo seco aumenta con la adición de agua y sobre todo cuando el suelo se encuentra saturado.

El suelo es un medio que contiene materias orgánicas y minerales separadas por espacios o poros, que a su vez están ocupados por agua y aire; las proporciones relativas de estos dos últimos constituyentes pueden variar mucho según la geometría de los espacios del suelo y el contenido de agua de la masa adámica. Dentro del suelo pueden tener lugar la evaporación, la condensación y movimientos del vapor de agua, y para un suelo inicialmente muy seco, la difusividad puede aumentar en un orden de magnitud cuando se le añade una pequeña cantidad de agua, dado que cantidades de calor relativamente grandes se transfieren por evaporación y condensación del agua de los poros. La adición de agua a un suelo seco conduce al reemplazo del aire de los poros celulares por agua y a un mejoramiento del contacto térmico entre partículas adyacentes resultando ambos procesos en el aumento de la conductividad, y por lo tanto la difusividad aumenta.

Con una mayor cantidad de agua, no obstante, cualquier aumento de la conductividad es más desestimable frente al aumento de ρc . Existe, por lo tanto un valor máximo de difusividad térmica K (que gobierna la transmisión de ondas de temperatura en el suelo).

2.2.6 Variación diurna y anual de la temperatura del suelo a diferentes profundidades

El tema será tratado desde el punto de vista de la transmisión de un pulso de calor desde la superficie hacia el interior del suelo; pero los mismos principios son aplicables a los casos en que, la capa superficial se enfría y el calor fluye hacia el exterior, y por lo tanto las ondas térmicas se desplazan desde las capas internas hacia la superficie. El aumento de temperatura en cualquier nivel del suelo, después que recibe energía en la superficie será:

- Mayor y tendrá lugar más rápidamente, cuanto más grande sea el pulso de calor en la superficie; pero
- Menor cuanto mayor sea la capacidad calorífica volumétrica, ρc .

Las observaciones de temperatura, aun cuando sólo sean realizadas en un período limitado a un año, revelan claramente que:

- a) Existe una variación diurna de la temperatura en superficie, que se extiende hasta una

profundidad de alrededor de un metro, debajo de la cual las variaciones son demasiado pequeñas como para medirlas con un equipo convencional;

- b) Ésta se superpone a una variación estacional en fase con las estaciones. Suponiendo una profundidad de suelo suficiente, la variación estacional se hace desestimable a profundidades entre 5 m a 20 m, según las condiciones y el tipo de suelo. Se podría admitir como razonable una cifra promedio de entre 7 m a 10 m de profundidad;
- c) Las observaciones de la variación diaria y más aún, de la variación estacional de la temperatura del suelo, demuestran que
 - i) La amplitud de la fluctuación disminuye al aumentar la profundidad;
 - ii) Con el aumento de profundidad, los instantes en que se registran el máximo y el mínimo se producen con retardo creciente respecto de los de superficie. Esto se muestra más claramente en la curva anual, y con menor nitidez en la curva diaria.

Una teoría sencilla que explica gran parte de las variaciones de la temperatura con la profundidad y conduce a resultados de valor práctico se basa en las siguientes hipótesis

Hipótesis 1. La transferencia de calor a través del suelo se da sólo por el mecanismo de conducción.

Hipótesis 2. Los cambios de temperatura de la superficie siguen una curva sinusoidal simple: los cambios diarios se deben al curso diario del Sol, y los estacionales a la variación estacional de la radiación de onda corta (solar);

Hipótesis 3. La conductividad térmica k del suelo involucrado considerado en su conjunto como un bloque, es constante con la profundidad, con la hora del día y la época del año.

Las hipótesis anteriores, permiten establecer el siguiente modelo teórico para calcular la rapidez de transferencia de calor H en el suelo. Como ya se mencionó anteriormente, en un nivel z del suelo (que no tiene porque ser la superficie), la rapidez de transferencia de calor H , está dada por la ley de la conducción del calor de Fourier:

$$H(z) = -k(z)A \frac{dT}{dz} \quad (\text{Ec. 2.9})$$

El flujo de calor por unidad de área $G(z) = \frac{H(z)}{A}$ en el nivel z , será:

$$G(z) = -k(z) \frac{dT}{dz} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

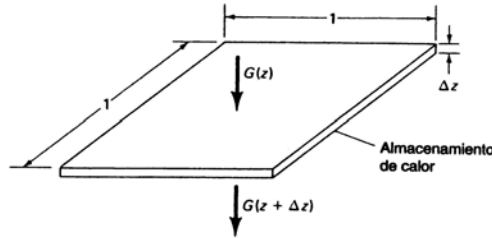


Fig. 2.8. Una lámina delgada de suelo de área unitaria mostrando los flujos del sistema y el almacenamiento dentro del sistema de entrada y salida.

En general, la conductividad térmica $k(z)$, depende de varios factores como la composición del suelo, su humedad y su temperatura. En el nivel $z + \Delta z$, se tiene que

$$G(z + \Delta z) = -k(z + \Delta z) \frac{dT}{dz} \quad (\text{Ec. 2.11})$$

La variación de G en una capa de suelo corresponde a la derivada de G respecto de z , esto es:

$$\Delta G = G(z + \Delta z) - G(z) \equiv \frac{dG(z)}{dz} \Delta z$$

De donde se obtiene

$$\Delta G = \frac{d}{dz} \left[-k(z) \frac{dT}{dz} \right] \Delta z \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Pero la cantidad de calor almacenado por unidad de área en la capa de suelo, está dada por la capacidad calorífica volumétrica, ρc , de la lámina por la rapidez de cambio de la temperatura entre las dos caras, que se escribe como:

$$\Delta G = -(\rho c) \frac{dT}{dt} \Delta z \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

- ρ es la densidad del suelo,

- c es el calor específico del suelo, y
- $\frac{dT}{dt}$ es la variación de temperatura en el tiempo.

La cantidad de calor dado por la ecuación 2.13, es igual a la diferencia entre el flujo de calor desde el suelo hacia el exterior $G(z + \Delta z)$ y el flujo de calor hacia el interior del suelo $G(z)$ dado por la ecuación 2.12, es decir, comparando estas dos últimas expresiones, se obtiene

$$-(\rho c) \frac{dT}{dt} \Delta z = -\frac{d}{dz} \left[k(z) \frac{dT}{dz} \right] \Delta z$$

Para una capa de suelo homogénea, $k(z)$ será constante e independiente de z , entonces

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{k}{\rho c} \right) \frac{d^2 T}{dz^2}$$

Usando la definición de la difusividad térmica $K = \frac{k}{\rho c}$, se obtiene

$$\frac{dT(z,t)}{dt} = (K) \frac{d^2 T(z,t)}{dz^2} \quad (\text{Ec. 2.14})$$

La ecuación 2.14 establece que la velocidad con que varía la temperatura del suelo, depende del perfil térmico. Si para una profundidad z el perfil térmico es conocido, se pueden calcular $\frac{dT}{dz}$ y

$\frac{d^2 T}{dz^2}$ y así conocer la variación de temperatura con el tiempo.

Esta ecuación es muy difícil de resolver, porque es una ecuación diferencial parcial de dos variables. Se puede obtener una solución de esta ecuación suponiendo suelo homogéneo no infinito. Se obtienen resultados que sirven como modelos, pero en algunos casos reales los valores dados por este modelo son muy diferentes.

Si se supone que la superficie del suelo se calienta en forma periódica, como en los ciclos de calentamiento diurno y anual, además, suponiendo que la variación de la temperatura en la superficie ($z = 0$) y en un instante t dentro del período está dada por:

$$T(0,t) = T_{med} + A(0)\sin(\omega t) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

- T_{med} es la temperatura media diaria o anual durante el período,
- $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ es la frecuencia angular,
- τ es el período igual a 24 horas o un año, y
- $A(0) = \frac{1}{2}(T_{m\acute{a}x} - T_{m\acute{i}n})$ es la mitad de la amplitud térmica.

El método implica que la temperatura media durante el período es la misma a todas las profundidades, lo que varía es la fluctuación diaria (o anual) alrededor de esta cifra media, por supuesto ésta es una suposición muy fuerte. Con todas estas suposiciones, la solución $T(z,t)$ que corresponde a lo observado, es

$$T(z,t) = T_{med} + A(z)\sin\left(\omega t - \frac{z}{D}\right), \text{ con } A(z) = A(0)e^{-z/D} \quad (\text{Ec. 2.16})$$

La profundidad $D = \sqrt{\frac{2K}{\omega}}$ es muy importante, pues para $z = D$ se tiene $A(D) = A(0)e^{-1}$. Donde e es la base de los logaritmos neperianos. D se llama **profundidad de amortiguamiento**, es la profundidad donde la onda de temperatura disminuye a un valor $1/e$ de su valor en superficie; indica el lugar donde el intercambio de temperatura con el suelo es pequeño. La profundidad D depende del tipo de suelo y del período de calentamiento τ a través de ω .

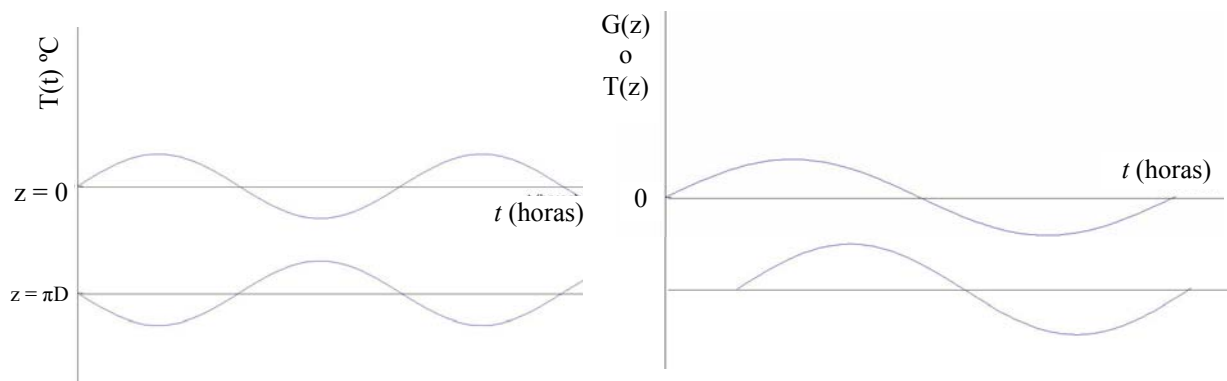


Fig. 2.9. Comportamiento periódico de la temperatura para las profundidades $z = 0$ y $z = \pi D$

La temperatura máxima se produce cuando $\omega t - \frac{z}{D} = \frac{\pi}{2}$ y la mínima cuando $\omega t - \frac{z}{D} = -\frac{\pi}{2}$. Otra profundidad importante es para $z = \pi D$, aquí la onda $T(z, t)$ está en fase opuesta con la onda en superficie $T(0, t)$. Gráficamente se t (horas) n la figura 2.9, a la izquierda.

Ahora se puede calcular $G(z, t)$, resultando:

$$G(z, t) = \frac{(\sqrt{2})A(0)}{D} K e^{-z/D} \sin\left(\omega t - \frac{z}{D} + \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Y en la superficie,

$$G(0, t) = \frac{(\sqrt{2})A(0)K}{D} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Comparando 2.18 con 2.15, el flujo de calor en la superficie precede en $\frac{\pi}{4}$ o $\frac{1}{8}$ de ciclo a la temperatura de la superficie, esto es en 3 horas para el ciclo diurno y 1.5 meses para el ciclo anual. Por ejemplo si el calentamiento máximo se produce a las 12 horas, la temperatura máxima se producirá a las 15 horas; para valores medidos de T_{\max} se produce entre 1 y 3 horas después de G_{\max} . El esquema gráfico se muestra en la figura 2.9, a la derecha.

Las marchas de temperatura son consecuencia del balance radiativo. Una marcha diaria tiene en general la forma que se muestra en la figura 2.10.

La temperatura del suelo depende fuertemente de la hora del día, de la nubosidad y de las precipitaciones. Para ver lo que ocurre con la profundidad, se analiza la ecuación 2.16, solución de la ecuación de conducción de calor (2.14):

$$T(z, t) = T_{\text{med}} + A(0)e^{-z/D} \sin\left(\omega t - \frac{z}{D}\right)$$

Se observa que la exponencial dará un decrecimiento de la amplitud térmica diaria debajo de la superficie (figura 2.11). Al tiempo que se registra la máxima temperatura en superficie, habrá un desfase en el tiempo respecto de la hora en que se produce el máximo en profundidad. Lo mismo vale para el ciclo anual.

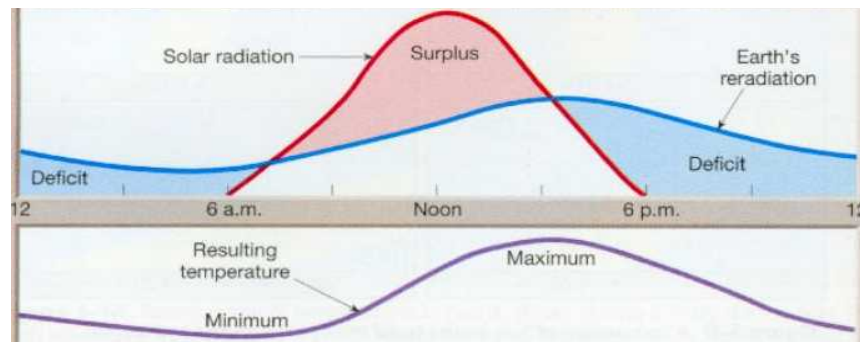


Fig. 2.10. Forma general de una marcha diaria de temperatura. (Principios de Microclimatología. Inzunza, J. 2002)

Un ejemplo de la aplicación de este modelo se encuentra en el ciclo anual de la temperatura del suelo a distintas profundidades en la estación meteorológica Bellavista de la Universidad de Concepción, que se muestra en la figura 2.12. Se observa que a 2 cm de profundidad en el suelo, los valores en época de altas temperaturas son muy superiores a la temperatura del aire y en el período de invierno son similares. A mayor profundidad, las temperaturas del suelo son menores que las del aire en época de bajas temperaturas y se puede apreciar un desfase de un mes en promedio mensual entre los valores extremos: la temperatura mínima del aire se produce en junio y en el suelo en julio y la máxima en el aire en enero y en el suelo en febrero. También es apreciable una disminución de la amplitud térmica debajo de la superficie, de acuerdo con la teoría.

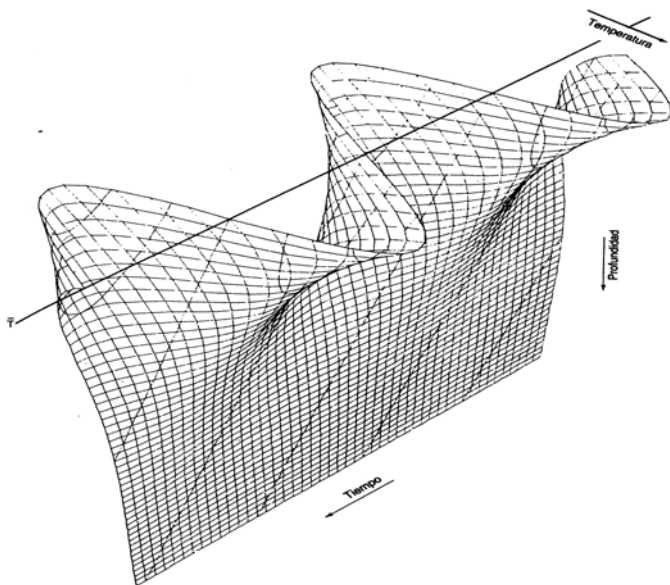


Fig. 2.11. a) Gráfico tridimensional de la temperatura del suelo como función del tiempo y de la profundidad, mostrando la atenuación de la onda de temperatura con la profundidad y el retardamiento de la máxima y mínima a tiempos posteriores con el aumento de la profundidad, como es expresado por la ecuación 2.16 (Principios de microclimatología. Inzunza, J. 2002)

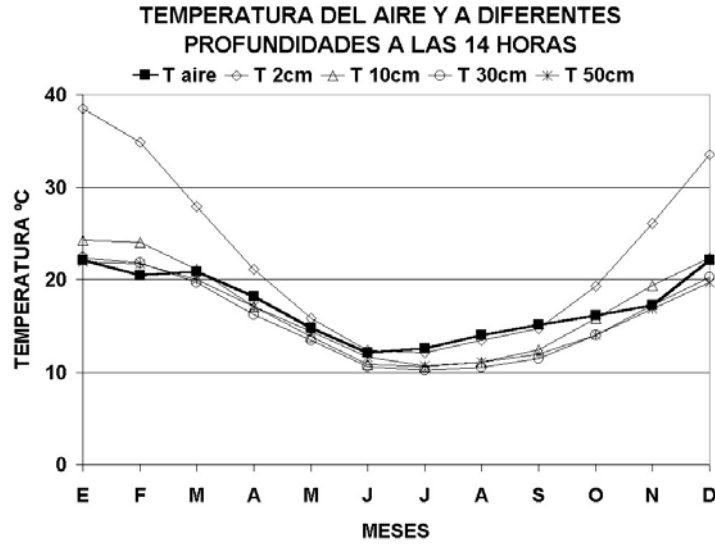


Fig. 2.12. Ciclo anual de la temperatura del suelo a distintas profundidades en la estación meteorológica Bellavista de la Universidad de Concepción, Chile. (Principios de Microclimatología. Inzunza, J. 2002)

A partir de la ecuación 2.16, se observa que el instante t en el que se alcanza la temperatura máxima en la profundidad z , se produce cuando $\sin(\omega t - z/D) = 1$, siendo D la profundidad de amortiguamiento. Este instante está dado por:

$$\omega t - \left(\sqrt{\frac{\omega}{2K}} \right) z = \frac{\pi}{2} \quad (\text{Ec. 2.19})$$

De la ecuación 2.19 se puede calcular la velocidad $v = \frac{dz}{dt}$, con la cual disminuye la temperatura máxima dentro del suelo, llamada **velocidad de amortiguamiento**

$$\omega - \left(\sqrt{\frac{\omega}{2K}} \right) \frac{dz}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{dz}{dt} = \omega \sqrt{\frac{2K}{\omega}}$$

$$v = \sqrt{2K\omega} \quad (\text{Ec. 2.20})$$

El intervalo de tiempo entre la temperatura máxima a una profundidad z_1 y la temperatura a otra profundidad mayor z_2 se puede calcular a partir de la ecuación 2.19. Considerando que el instante t_1 para el que T es máxima en la profundidad z_1 , es:

$$\omega t_1 - \frac{z_1}{D} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow t_1 = \frac{\pi}{2\omega} + \frac{z_1}{\omega D}$$

Y, el instante t_2 para el cual la temperatura tiene un valor T en una profundidad z_2 mayor, es:

$$\omega t_2 - \frac{z_2}{D} = \frac{\pi}{2} \Rightarrow t_2 = \frac{\pi}{2\omega} + \frac{z_2}{\omega D}$$

Luego, el intervalo de tiempo será:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \left(\frac{\pi}{2\omega} + \frac{z_2}{\omega D} \right) - \left(\frac{\pi}{2\omega} + \frac{z_1}{\omega D} \right)$$

$$\Delta t = \frac{z_{max} - z}{\omega D} \quad (\text{Ec. 2.21})$$

En este modelo, la diferencia entre los suelos está completamente expresada por K a través de D ; y la diferencia entre los períodos, por ω .

La suposición de que se usa una sola onda sinusoidal anual hace que este método no pueda ser aplicable a regiones polares y ecuatoriales y en lo referente a la variación diaria adecuada (como sucede en los días nublados de invierno). En realidad, la fluctuación diaria cercana a la superficie (es decir para profundidades de hasta 10.0 cm –15.0 cm) está representada bastante inadecuadamente, por una sola onda sinusoidal, considerándose más apropiada la de dos términos armónicos. Dos motivos de esta dificultad son la variación estacional del momento de ocurrencia de la mínima diaria y la ausencia frecuente de una fluctuación diurna marcada durante el “semestre invernal”.

Esta segunda condición imposibilita el uso del método donde haya cobertura de nieve extensa/prolongada donde el perfil del suelo exhiba capas con diferencias muy marcadas. En lo referente a la variación diaria el enfoque puede no ser útil cuando, por ejemplo, la capa superficial del suelo tiene un contenido orgánico notablemente más alto que el subsuelo; y en lo referente a la variación estacional puede no ser útil cuando una capa de suelo yace sobre roca o cuando existe una capa freática a pocos metros de profundidad.

2.3 EFECTOS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO SUPERFICIAL Y CERCANO A LA SUPERFICIE Y DE LA CUBIERTA VEGETAL SOBRE LA TEMPERATURA DEL SUELO

La parte superior del suelo cubierto de vegetación absorbe considerable radiación incidente. El resto de la radiación atraviesa la cubierta vegetal y es absorbida por las hojas inferiores y por la superficie del suelo. El transporte de calor en la superficie del suelo por debajo de una cubierta vegetal se realiza de la misma manera que en suelo desnudo.

La temperatura en las capas superiores del suelo muestra variaciones diurnas y anuales e irregularidades debido al estado del tiempo. Según el tipo de suelo y su estructura, las temperaturas del suelo en el ciclo anual, se mantienen constantes a profundidades de alrededor de 10 m o más. Debajo de esta capa existe una capa freática que tiene una temperatura constante aproximadamente igual a la temperatura media anual. El intercambio de aire entre la atmósfera y el suelo no puede influenciar la temperatura del suelo, debido a la pequeña densidad del aire respecto al suelo.

Una caída repentina de la temperatura del suelo puede ser causada por lluvias abundantes o chaparrones. Cuando los suelos están saturados, las capas superiores de los suelos pesados pueden ser enfriadas directamente por el agua de lluvia. Cuando se producen lluvias, la disminución de la temperatura en las capas que se encuentran algunos centímetros por debajo del frente de agua, generalmente se debe más a la disminución de la radiación neta que al agua misma. En los suelos arenosos donde el agua se percola rápidamente, es medible un efecto de enfriamiento por lluvia, que dura tanto como la humedad en el suelo y su capacidad calorífica se modifica.

La influencia de la radiación en la temperatura del suelo es evidente en las pendientes. Debido a la turbulencia y a la fuerza ascensional del aire en días soleados, la exposición y la inclinación de estas pendientes tienen efectos mucho más importantes en la temperatura máxima diaria del suelo que en la del aire.

La radiación neta de la superficie del suelo puede cambiarse alterando el color de la superficie. Este método es usado en la agricultura para calentar las capas más altas del suelo, especialmente en los climas templados con una estación fría, donde se utilizan materiales oscuros para aumentar la temperatura del suelo en primavera para tener una germinación precoz; o para evitar las altas

temperaturas pulverizando finas capas de polvo blanco (limo) sobre la tierra, lo que hace descender la temperatura del suelo, antes de que el viento y la lluvia reduzcan la efectividad del polvo.

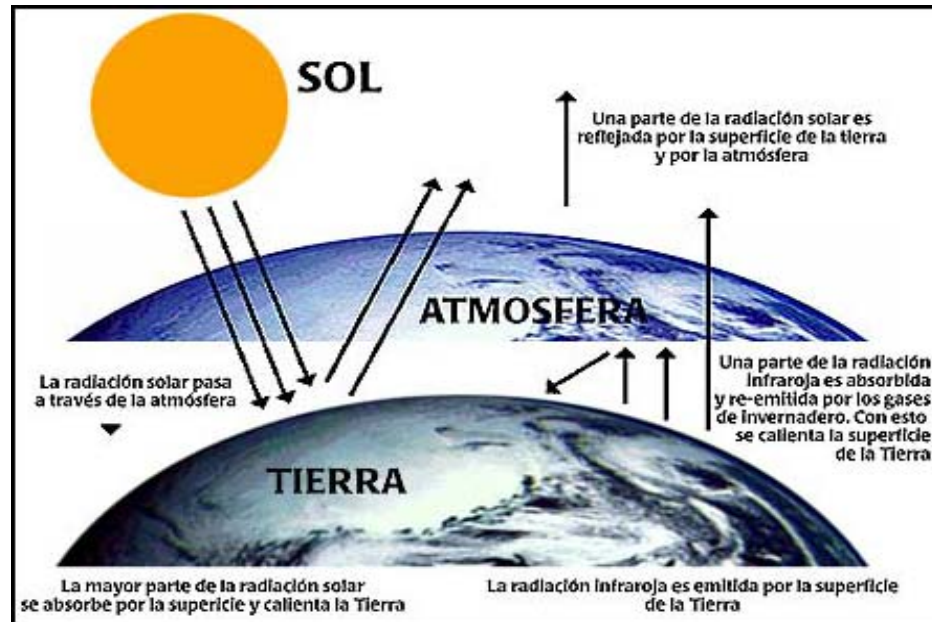


Fig. 2.13. Balance radiativo de la Tierra. (<http://es.wikipedia.org>)

Las fluctuaciones periódicas de la temperatura del suelo se deben a las fluctuaciones diarias y anuales de la radiación solar recibida en la superficie. La temperatura máxima en la superficie se alcanza cuando el flujo de calor hacia el interior del suelo contrarresta exactamente el flujo hacia el exterior, y por lo tanto depende no sólo de la radiación incidente sino también de la transferencia de calor en el suelo y el aire que está por encima de la superficie. Por lo tanto no es raro que la temperatura máxima de superficie se produzca más tarde que el mediodía local. Durante la noche la superficie generalmente continua enfriándose hasta que el descenso de temperatura se ve detenido por la aparición de la radiación solar del amanecer, momento en que la curva de temperatura sube nuevamente.

2.3.1 Importancia biológica de la temperatura del suelo

Las plantas viven generalmente en dos medios: en el aire cercano a la tierra y en la capa superior del suelo. El suelo es el único medio en el que viven la mayoría de las plantas en su primera etapa

de vida, antes que las semillas germinen. La temperatura del suelo puede ser un factor limitante para la germinación de la semilla, crecimiento de las raíces, desarrollo de los tubérculos, descomposición de la materia orgánica dentro del suelo y, por lo tanto, para la cantidad de dióxido de carbono que pasa del suelo a la capa planta–aire y de ésta a la atmósfera. La evapotranspiración, la temperatura del aire cercano a la tierra y su variación diaria se ven influenciadas por las propiedades físicas de las capas del suelo más próximas a la superficie, como así también por diferentes tipos de cubiertas naturales o artificiales del mismo.

La germinación de las semillas requiere de temperaturas mínimas de alrededor de $1^{\circ} - 3^{\circ} \text{ C}$, óptimas que pueden variar entre 15° C y 28° C según las semillas y temperaturas máximas que generalmente son de 30° C . Estos rangos definen las fechas de siembra.

CAPÍTULO 3

DISEÑO METODOLÓGICO

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los datos utilizados, así como información específica de la estación en estudio, el tipo y uso de los suelos en la zona de la misma. Además, se presentan los procedimientos utilizados para la realización del análisis de los datos así como los software usados para calcular el desfase, la periodicidad, la difusividad y la relación existente entre las variables es estudio.

3.1 BASE DE DATOS

La base de datos utilizada en la presente investigación fue proporcionada por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET) y consta de medidas de temperatura a diferentes profundidades en el suelo (2.0 cm, 5.0 cm, 10.0 cm, 20.0 cm) y, de medidas de temperatura del aire a un metro sobre la superficie del suelo, para la Estación Meteorológica de El Papalón. El tiempo de estudio comprende 16 meses, desde enero de 2002 hasta abril 2003.

El registro de los datos de temperatura, así como de otros datos climatológicos (precipitación, presión atmosférica, etc.), fue realizado para tres horas diferentes durante cada día y a lo largo del tiempo de estudio, a saber, Hora I: 7:00 a.m., Hora II: 2:00 p.m. y Hora III: 9:00 p.m. Dicha base de datos fue proporcionada de manera manual, contenida aún en los formularios para registros diarios, por lo que fue necesario digitar toda la información. Posteriormente, se procedió al ordenamiento y selección de los registros necesarios para desarrollar la presente investigación.

Previo a iniciar el análisis de los datos, estos fueron separados en tres periodos; a saber, período I: del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002 (época seca I); período II: del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002 (época lluviosa I); período III: del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003 (época seca II). Esta clasificación de los datos se realizó tomando en consideración los registros de precipitación tomados simultáneamente a los datos de temperaturas.

La estación de El Papalón se encontraba ubicada en la Ciudad de San Miguel, al noreste del cerro Muncinga y al sureste de la laguna Aramuaca, como se muestra en la figura 3.3. Esta región es semi-plana con suelos arcillosos y cultivos de maíz predominantemente. Actualmente, la estación meteorológica considerada se encuentra ubicada en las instalaciones de la Facultad Multidisciplinaria Oriental de la Universidad de El Salvador.

Considerando la regionalización climática de Holdridge, la zona de interés se clasifica como “Bosque húmedo subtropical (con biotemperaturas menores a 24° C y temperaturas del aire media anuales mayor a 24° C), aunque actualmente esta zona se encuentra deforestada casi por completo. Los rumbos de los vientos son predominantes del norte en la estación seca, y del sur en la estación lluviosa.

Respecto al uso de los suelos, tal como se observa en la figura 3.2, allá la zona en donde se encontraba la estación en estudio era una zona de cultivo de algodón.

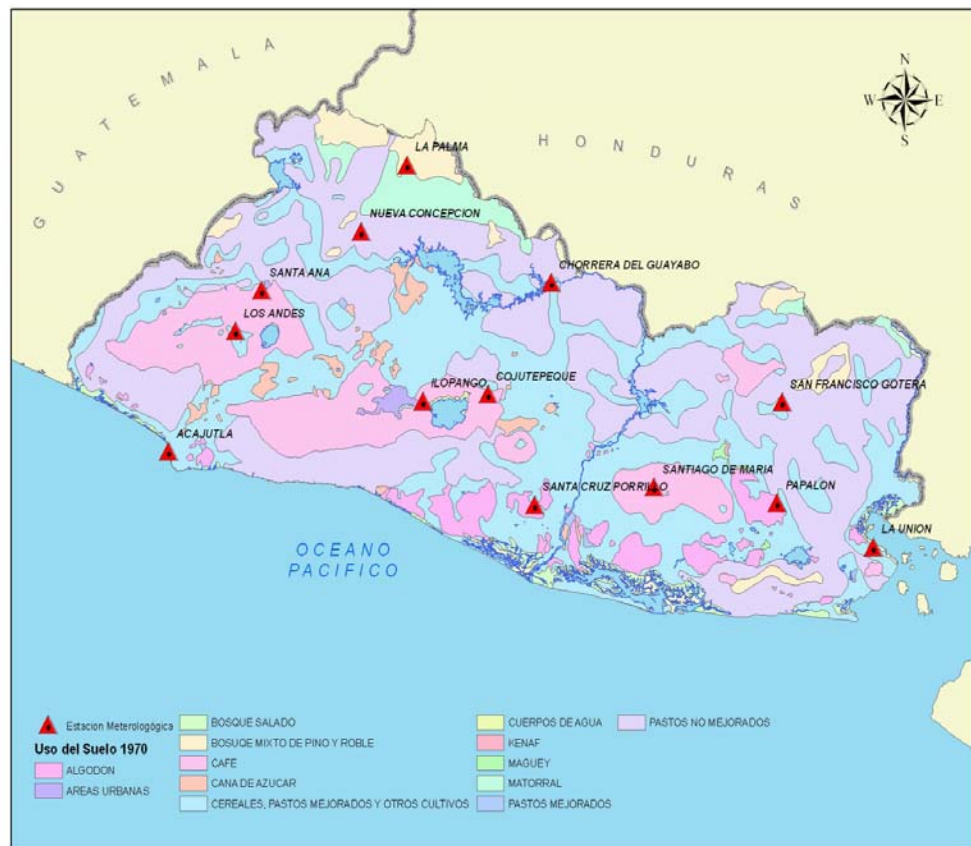


Fig. 3.2. Mapa de uso de suelos correspondiente a 1970. **Fuente:** SNET

3.3 DETERMINACIÓN DE LA DIFUSIVIDAD

Ya se revisó en el capítulo 2 que las soluciones analíticas de la ecuación 2.9, correspondiente a la ley de conducción de calor de Fourier a través de un bloque suelo son bastante complejas; por ello, para facilitar la determinación de la difusividad térmica del suelo se usarán las soluciones aproximadas (obtenida por métodos numéricos) que son utilizadas con mucha frecuencia. Dados los supuestos de que las propiedades térmicas del suelo son independientes de la profundidad y del tiempo, su caracterización se reduce a un solo parámetro: *la difusividad térmica K*.

Además, considerando que el objetivo de la presente investigación es utilizar las series históricas disponibles para la descripción del flujo de calor a través del suelo, se adoptó *el método de fase directa* (DPM1/DPM2) para la determinación de la difusividad térmica. Este modelo toma las fases de las ondas de temperatura a dos diferentes profundidades, y las superpone considerando que son iguales.

Se debe recordar que la ecuación 2.16 representa la solución de la ecuación de las ondas de temperaturas (Ec. 2.14) del modelo físico descrito en el capítulo 2,

$$T(z,t) = T_{med} + A(z) \operatorname{sen}\left(\omega t - \frac{z}{D}\right), \text{ con } A(z) = A(0)e^{-z/D}$$

Siendo D la profundidad de amortiguamiento, cuyo valor se obtiene por medio de la expresión

$$D = \sqrt{\frac{2K}{\omega}}$$

Sustituyendo el valor de D en la ecuación 2.16, se obtiene

$$T(z,t) = T_{med} + A(0)e^{-z\sqrt{\frac{\omega}{2K}}} \operatorname{sen}\left(\omega t - z\sqrt{\frac{\omega}{2K}}\right) \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde:

- T_{med} es la temperatura media del suelo diaria o anual,
- $A(0)$ es la amplitud térmica en la superficie
- $\omega = \frac{2\pi}{24h}$ es la frecuencia angular fundamental de la onda de temperatura en la superficie, considerando un período de 24 horas.

Considerando el primer armónico, según el *método de fase directa* (DPM1/DPM2), las fases de las ondas de temperatura a dos profundidades diferentes pueden ser igualadas. Haciendo esto, se puede resolver la ecuación 3.1 considerando dos profundidades z_1 y z_2 en los instantes t_1 y t_2 respectivamente, obteniéndose que la difusividad térmica es:

$$K = \frac{I}{2\omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{t_2 - t_1} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Donde t_m es la medida de los instantes de ocurrencia del máximo o mínimo de la temperatura del suelo a una profundidad dada z_m para $m = 1, 2$. Es importante considerar algunas restricciones concernientes a la viabilidad de la ecuación 3.2. La dificultad de esta expresión es que son necesarias medidas frecuentes para la estimación exacta de t_m . En días nublados, varios máximos de temperatura pueden ocurrir, lo cual dificulta enormemente una interpretación en la determinación de t_m .

Luego, se puede considerar el segundo armónico y, usando los supuestos antes mencionados, la difusividad térmica se puede calcular por medio de la expresión

$$K = \frac{I}{2\omega} \left(\frac{z_2 - z_1}{\frac{I}{2\omega} \ln Y} \right)^2 \quad (\text{Ec. 3.3})$$

Siendo:

$$Y = \frac{(T_1 - T_3)^2 + (T_2 - T_4)^2}{(T'_1 - T'_3)^2 + (T'_2 - T'_4)^2} \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Donde las temperaturas T_m y T'_m son los datos registrados cada 6 h para dos profundidades diferentes z_1 y z_2 , respectivamente. Estas ultimas ecuaciones se utilizan en el presente trabajo para determinar la difusividad térmica K .

3.4 SOFTWARE ESTADISTICOS UTILIZADOS

El análisis estadístico de los datos de temperatura se realizó apoyándose en la hoja de cálculo de Microsoft Office, EXCEL, y el paquete estadístico profesional SPSS.

CAPÍTULO 4

PRESENTACION DE RESULTADOS

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de los datos de temperatura proporcionados por el SNET, así como los procedimientos utilizados para dicho análisis. Como parte de este análisis, se muestra de forma gráfica el comportamiento temporal que sigue cada una de las variables estudiadas. Seguidamente, se presenta en forma gráfica, el análisis estadístico utilizado para correlacionar, primero entre sí, las temperaturas del suelo a diferentes profundidades y, segundo, con la temperatura de la atmósfera. Finalmente, para caracterizar el suelo en el que se recolectó la base de datos de temperatura, se presenta el cálculo de la difusividad térmica K ; este cálculo se realizó utilizando el método de fase directa descrito en el capítulo 3, y su valor se obtuvo para cada mes del período de estudio (enero de 2002 - abril de 2003) y para dos profundidades (2.0 cm y 5.0 cm).

4.1 ESTUDIO DE LA MARCHA MENSUAL Y ANUAL DE LA TEMPERATURA PARA CADA PROFUNDIDAD

Como ya se mencionó en el capítulo 3, en esta investigación el período de estudio consta de 16 meses, desde enero de 2002 hasta abril de 2003. Además, la base de datos de temperatura fue separada en tres períodos tomando en consideración los registros de precipitación para esos años. La base de datos disponible está constituida por registros de temperatura tomados en tres horas diferentes durante el día y para cuatro profundidades en el suelo y para la temperatura del aire.

4.1.1 Marcha anual de las variables en estudio

En primer lugar, se analiza la marcha anual de la temperatura del suelo (T_s) a diferentes profundidades y la temperatura del aire (T_{ambiente}), para el periodo de estudio completo y a partir de promedios mensuales por cada hora de registro. La figura 4.1 muestra la marcha de las temperaturas estudiadas en la estación meteorológica de El Papalón correspondientes a la primera hora de registro (Hora I: 7:00 a.m.). En esta figura puede observarse que la temperatura del aire y la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad marchan de manera similar, esto se debe a que

el intercambio de aire entre el suelo y la atmósfera se da con mayor facilidad que a profundidades mayores.

Es de notar que en esta hora, la temperatura del suelo aumenta con la profundidad, de tal manera que a 20.0 cm es mayor que la temperatura a las otras profundidades y que la temperatura del aire, o sea $T_s(20\text{ cm}) > T_s(10\text{ cm}) > T_s(5\text{ cm}) > T_s(2\text{ cm})$. A esta hora, la radiación solar incidente sobre el suelo se esta incrementado, pero el flujo de calor se da hacia el exterior.

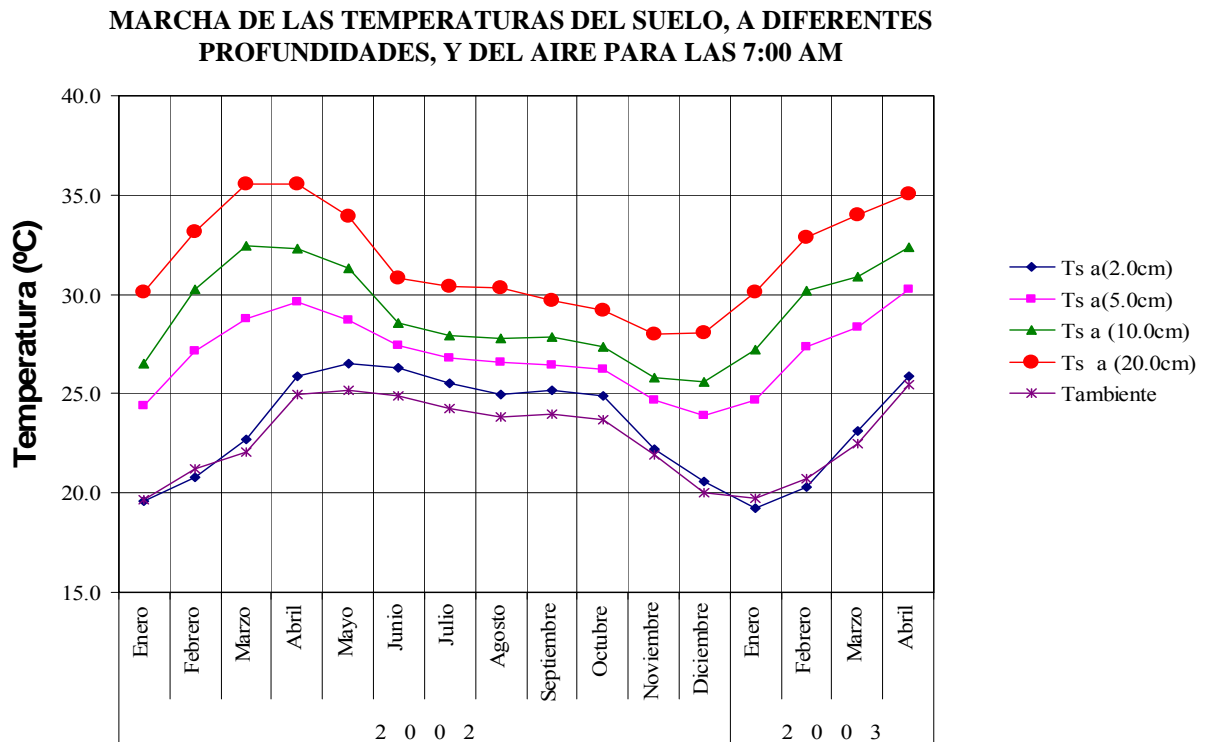


Fig. 4.1. Marcha de las temperaturas del suelo a diferentes profundidades y del aire para el periodo completo de estudio, con base en promedios mensuales, correspondiente a la Hora I: 7:00 a.m.

No hay que olvidar que durante la noche se da el proceso de enfriamiento del suelo, lo que implica emisión de radiación térmica, esto es lo que determina el perfil de temperatura para esta hora. Además, se debe recordar que el suelo tiene una capacidad calorífica alta entre 0.27 y 0.80 cal/g.°C lo que significa que es un buen acumulador de calor, y tiene además una baja conductividad térmica que hace que la penetración del calor (calentamiento) en el suelo sea lenta al igual que su enfriamiento. Otro aspecto importante que debe considerarse es que todo cuerpo a una temperatura T es un emisor de radiación térmica, de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann

(Ec. 2.6): $H = \sigma A e T^4$. Para el caso del suelo, la máxima emisividad está en la banda del infrarrojo.

Por tanto, la Tierra emite radiación térmica en toda su superficie permanentemente, en cambio, la radiación solar sólo se recibe en la cara diurna. Por eso, la Tierra se calienta de día y se enfría de noche; en otras palabras, la energía que llega al suelo a través de la radiación solar penetra en él en función de sus propiedades térmicas: capacidad calorífica, conductividad térmica, difusividad térmica, etc., que a su vez dependen de las características físicas del propio suelo y de su contenido de vapor de agua; en este proceso de penetración se sufre una serie de pérdidas por radiación, conducción, convección y evaporación.

En la figura 4.2 se presentan las marchas de las temperaturas estudiadas con base en promedios mensuales correspondientes a la segunda hora de registro (Hora II: 2:00 p.m.) y durante todo el periodo completo de estudio. En la figura 4.2 puede apreciarse que:

- ☞ A 2.0 cm de profundidad, los valores de la temperatura del suelo en época de altas temperaturas son muy superiores a la temperatura del aire, aunque la diferencia se reduce considerablemente en la estación lluviosa (mayo-octubre)
- ☞ En la estación lluviosa, se nota que en las capas superficiales del suelo (2.0 cm y 5.0 cm) el incremento de la humedad modifica considerablemente la marcha de la temperatura del suelo. Sin embargo, el régimen de marcha es muy similar para ambas profundidades.
- ☞ A mayor profundidad (20.0 cm y parcialmente para 10.0 cm), la temperatura del suelo es menor que la temperatura del aire. esto significa que a las 2:00 p.m. el calentamiento de las capas más profundas del suelo ha aumentado considerablemente.
- ☞ Se aprecia un desfase de dos meses entre los valores extremos de la temperatura del aire y la temperatura del suelo en la capa de mayor profundidad (20.0 cm).
- ☞ La temperatura mínima promedio del aire usualmente ocurre en enero o diciembre (según el modelo físico descrito en el capítulo 2). De la figura 4.2, es interesante notar que para la segunda hora de registro (2:00 p.m.), el mínimo se presente en septiembre. En cambio para la temperatura del suelo a 20.0 cm, el mínimo aparece entre noviembre y diciembre, al menos para este año.
- ☞ Para los valores máximos sucede algo diferente, se nota un desfase de tres meses, pues la

temperatura promedio máxima del suelo aparece en enero y, para la temperatura del aire su valor promedio máximo se presenta en abril, al menos para este el año.

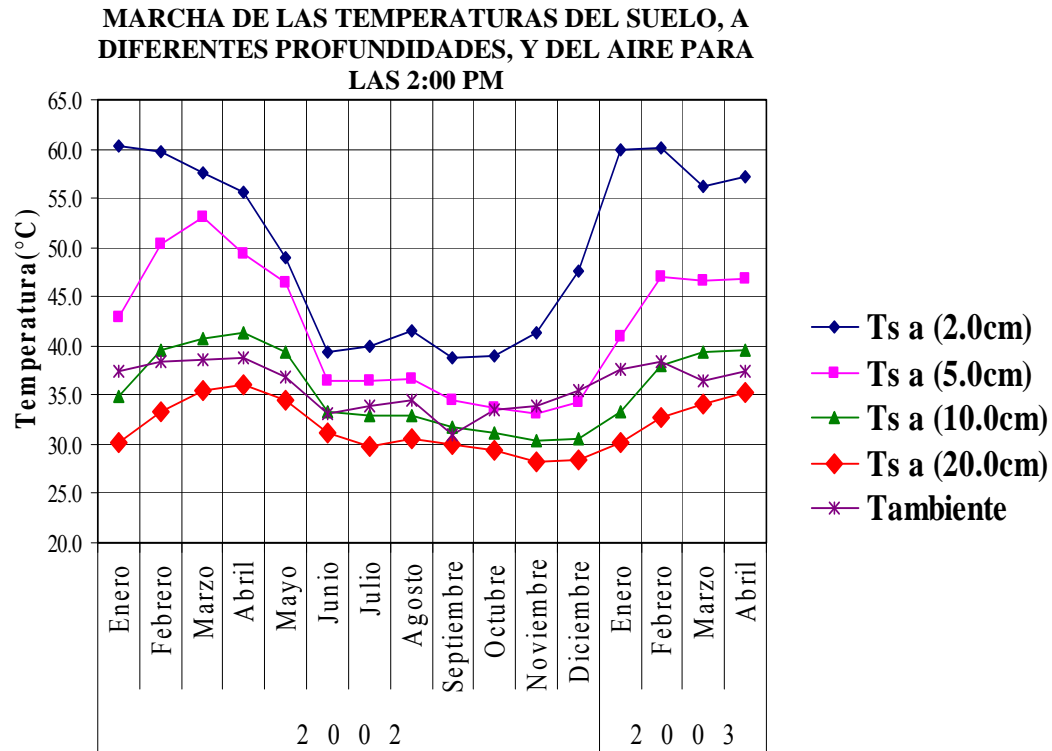


Fig. 4.2. Marcha de las temperaturas del suelo a diferentes profundidades y del aire para el período completo de estudio, con base en promedios mensuales, correspondiente a la Hora II: 2:00 p.m.

Otro detalle importante de la figura 4.2 es que claramente pueden apreciarse los períodos de transición entre las estaciones seca-lluviosa-seca, aunque con mayor facilidad en la marcha de la temperatura del suelo a 2.0 cm de profundidad. El período de transición de la estación seca-lluviosa corresponde al mes de mayo y el de la estación lluviosa-seca toma parte de octubre y noviembre. Esto concuerda con la separación de los datos de temperatura en períodos a partir de los registros de precipitación, realizada en la presente investigación.

Para el caso de la tercera hora de registro (Hora III: 9:00 p.m.), no se presenta una gráfica que muestre las marchas de las temperaturas porque los datos estaban incompletos.

4.1.2 Marcha mensual de las variables en estudio

La marcha mensual de las temperaturas del suelo, a diferentes profundidades, y la temperatura del aire, es de especial interés en los períodos de transición entre las estaciones seca-lluviosa-seca y, a la hora del día en la que el suelo alcanza el máximo calentamiento. También, es importante la comparación de las marchas correspondientes a los mismos meses de dos años diferentes, por ejemplo febrero 2002 y febrero 2003, pues el fenómeno estudiado en la presente investigación no es independiente de otros que se están sucediendo a cabo a escala mundial, como el calentamiento global. La figuras 4.3 muestra la comparación mencionada anteriormente.

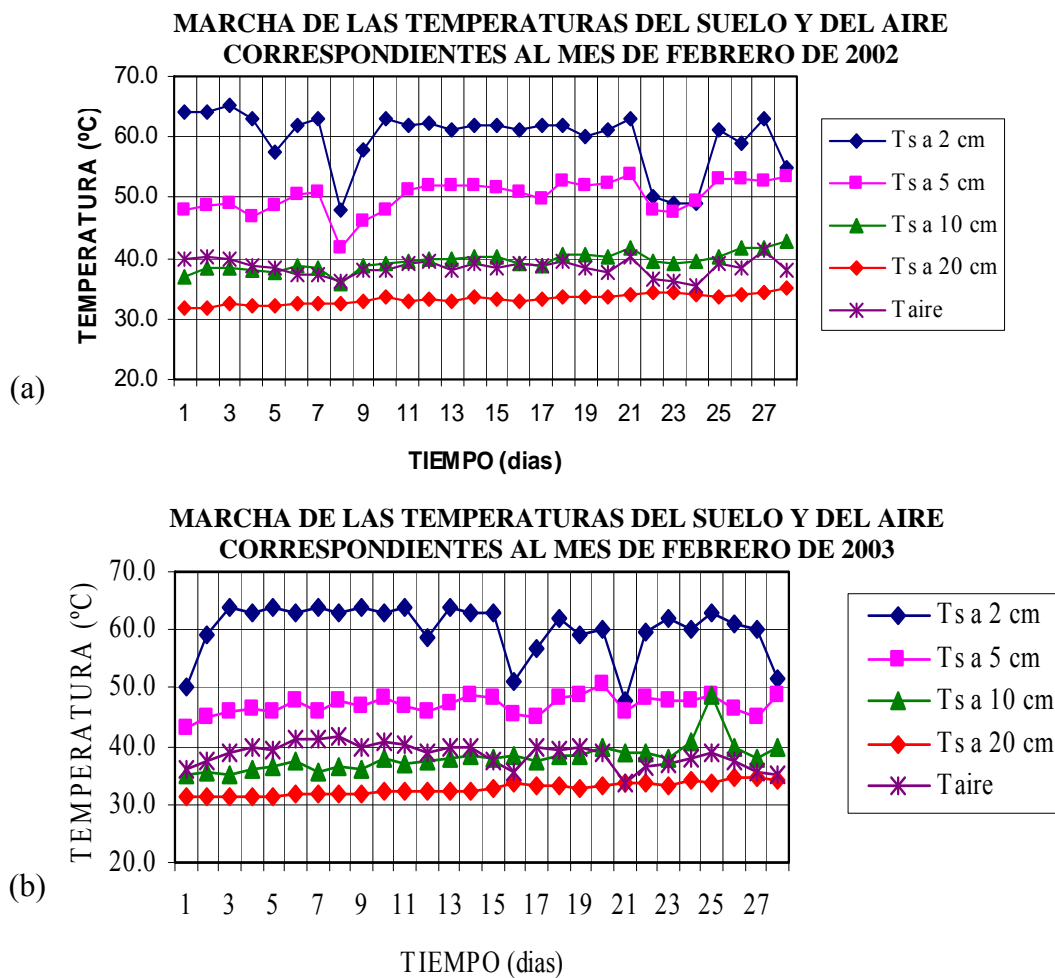


Fig. 4.3. Comparación de las marchas de las temperaturas del suelo y del aire para los meses de febrero de 2002 y febrero de 2003 a la 2:00 p.m.

De ésta figura se puede apreciar que la temperatura media del aire fue mayor para el año 2002 que para el 2003, al menos para los primeros meses. El mismo resultado se observa si se

comparan las temperaturas medias para una profundidad específica. En el caso de la temperatura del suelo a 2.0 cm correspondiente al año 2002, las caídas que se dan alrededor de los días 09 y 23 pueden se atribuidas a vientos o lloviznas. Respecto a la temperatura del suelo a 20.0 cm, ésta es prácticamente constante para ambos años, lo que indica las variaciones son menos drásticas en las capas profundas del suelo.

La figura 4.4 muestra la marcha de las temperaturas del suelo, a diferentes profundidades, y del aire para la segunda hora de registro durante el mes de mayo de 2002. En esta figura se aprecia claramente la estación lluviosa de ese año comenzó aproximadamente a partir del 18 de mayo, que es donde se inicia el periodo II considerado para el presente estudio.

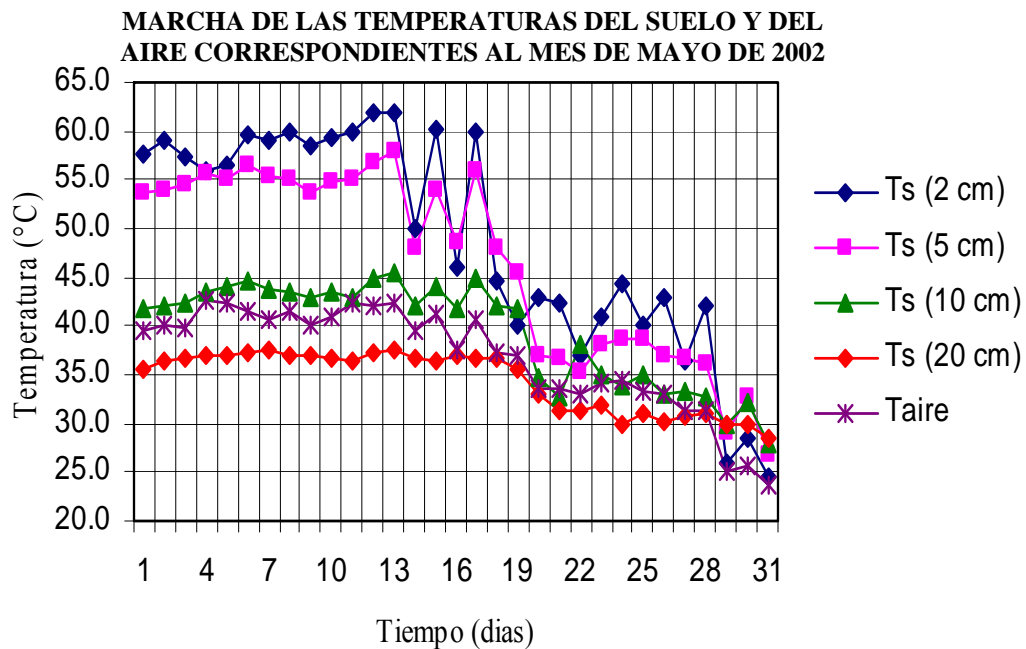


Fig. 4.4. Marcha de las temperaturas del suelo, a diferentes profundidades, y del aire para las 2:00 p.m. durante mayo de 2002. Este mes corresponde al período de transición entre la estación seca-lluviosa para este año.

Es de notar que en el caso de que el suelo esté húmedo, el balance de energía se modifica debido, por una parte, a que la humedad aumenta la conductividad y sobre todo la difusividad térmica, haciendo posible un flujo de calor hacia el interior del suelo más rápido y por lo tanto, un calentamiento más rápido. El agua tiene un calor específico más alto que el suelo y que el aire; así, la capacidad térmica del agua es más alta que la capacidad térmica del aire y que la tierra. A mayor capacidad térmica, una tasa más lenta en la disipación del calor.

La figura 4.5 muestra una comparación de las marchas mensuales de las temperaturas del suelo y del aire para las diferentes horas de registro (7:00 a.m., 2:00 p.m. y 9:00 p.m.), correspondientes al mes de enero de 2002. Con este mes inicia el período I de estudio (estación seca I). De esta figura se observa que: **Por la mañana** (a la 7:00 a.m.), el aire y la capa superficial del suelo están a la misma temperatura, pero ambos están más fríos que las capas más profundas (figura 4.5a).

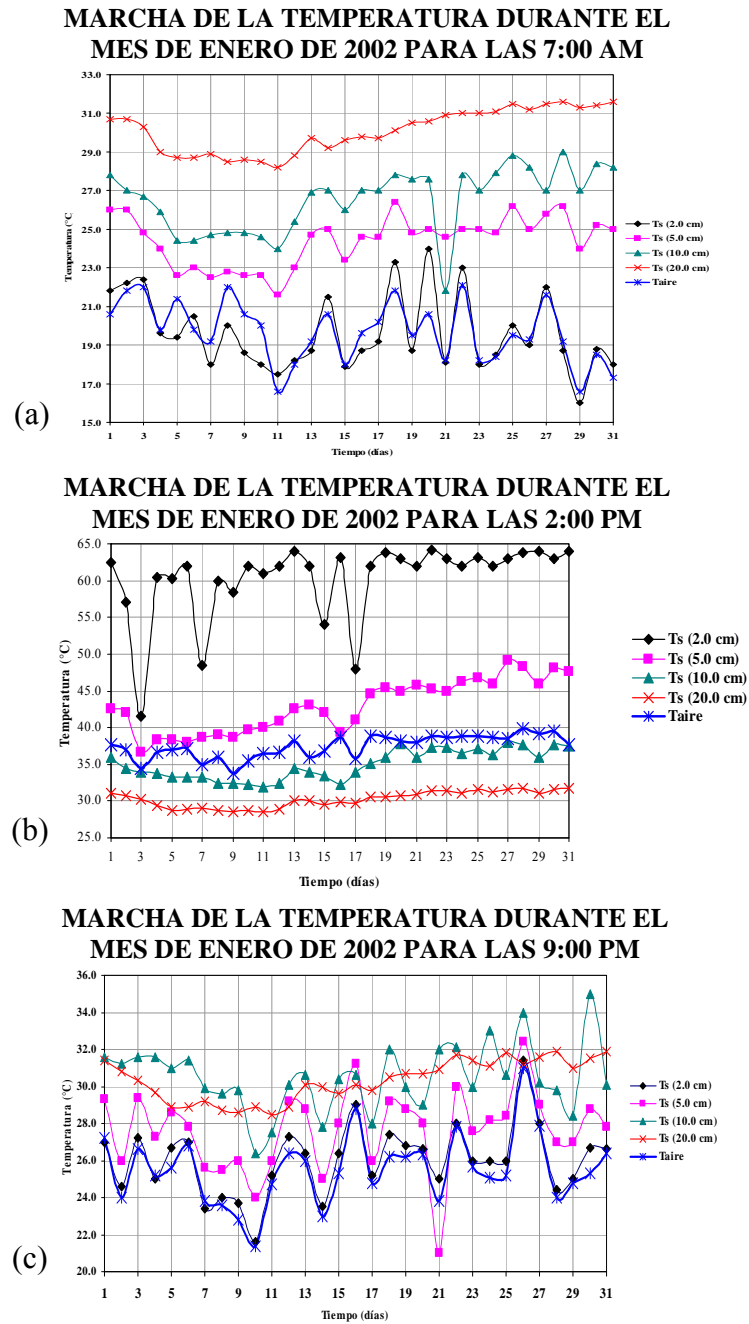
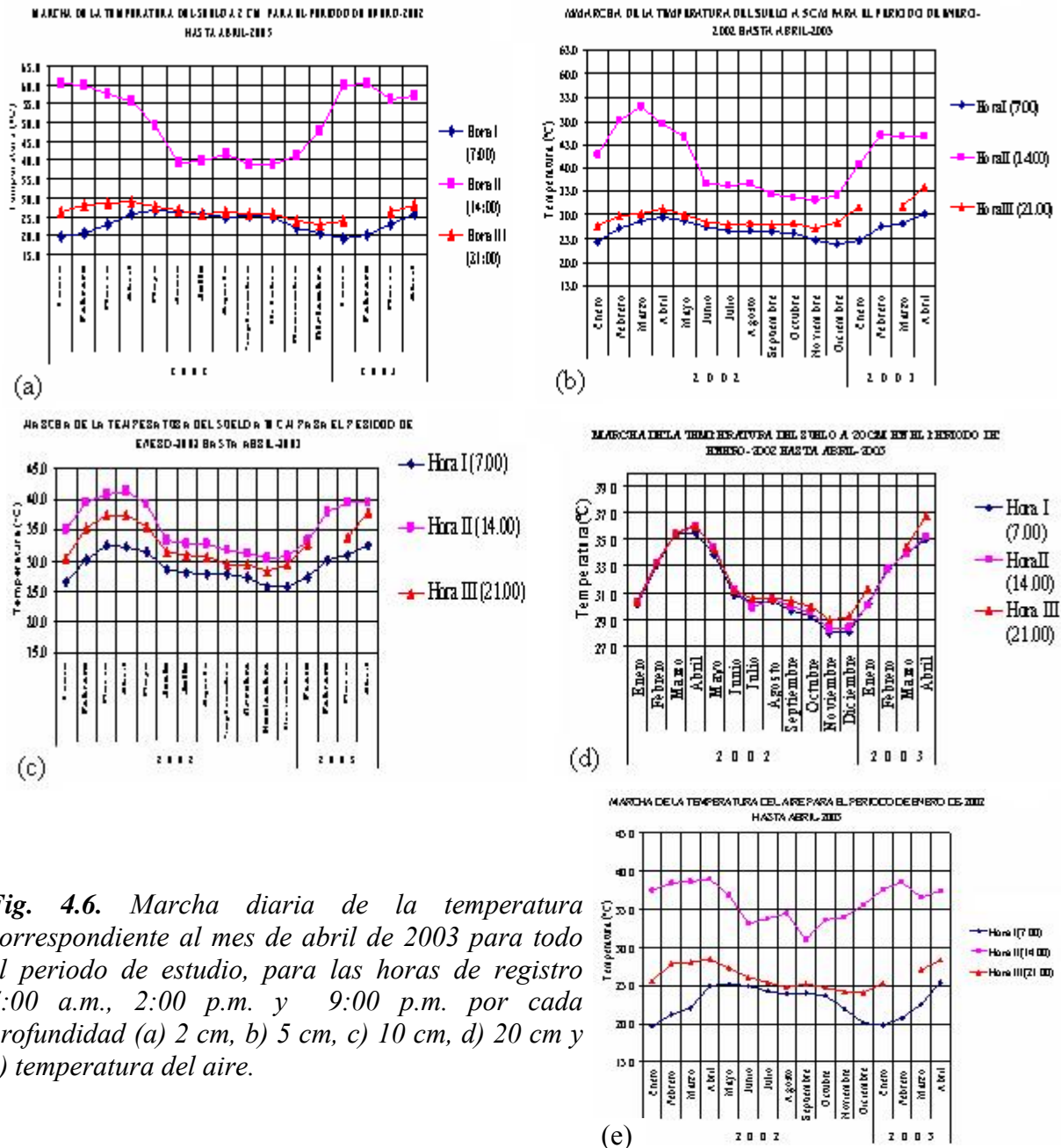


Fig. 4.5. Marcha diaria de las temperaturas en estudio correspondiente a enero de 2002, para las horas de registro a) 7:00 a.m., b) 2:00 p.m. y c) 9:00 p.m.

Por la tarde (2:00 p.m.), el aire alcanza una temperatura que se asemeja a la de las capas intermedias del suelo, pero se encuentra mucho más frío que la capa superficial; a esta hora en cambio, la capa más profunda del suelo está a menor temperatura que el aire (figura 4.5b). **Por la noche (9:00 p.m.),** al no haber luz del sol no hay radiación incidente sobre la superficie de la Tierra, por lo que el flujo de calor irá del suelo a la atmósfera. A esta hora, el aire y la capa



superficial del suelo se encuentran nuevamente a la misma temperatura, pero las capas más profundas están a mayor temperatura (figura 4.5c). Lo anterior se ajusta correctamente a las

predicciones del modelo físico descrito en el capítulo 2.

La figura 4.6 muestra la marcha diaria de las temperaturas del suelo por cada profundidad y para todas las horas de registro. En las figuras 4.6a, 4.6b y 4.6c se observa cómo se producen los incrementos de temperatura en la capa superficial e intermedia del suelo a lo largo del día. Es de notar que es a 2.0 cm de profundidad donde aparece el incremento más drástico, éste incremento es muy similar al que sufre el aire (figura 4.6e). Para la capa más profunda no sucede lo mismo, pues la temperatura permanece intacta a lo largo del día.

4.2 ESTUDIO DE CORRELACIÓN DE LAS TEMPERATURAS

Para la presente investigación es de especial interés detectar la relación de dependencia que existe entre las variables en estudio. Para ello, se realizó un análisis estadístico de correlación entre la temperatura del suelo, a diferentes profundidades, y la temperatura del aire; además, se efectuó el mismo análisis para correlacionar las temperaturas del suelo entre sí, para cada período.

4.2.1 Correlación lineal de las variables en estudio para el período I (Estación seca I)

Las figuras 4.7 y 4.8 presentan el estudio de correlación lineal entre la temperatura del suelo a dos profundidades (2.0 cm y 5.0 cm) con la temperatura del aire.

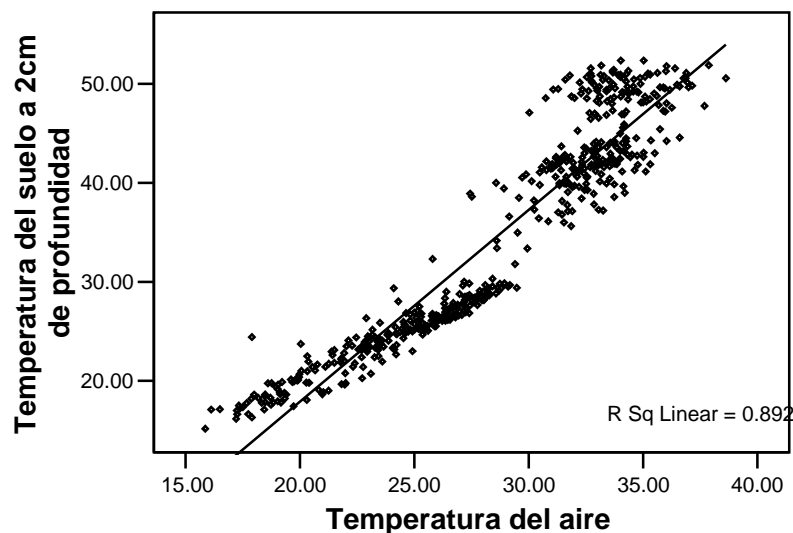


Fig. 4.7. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

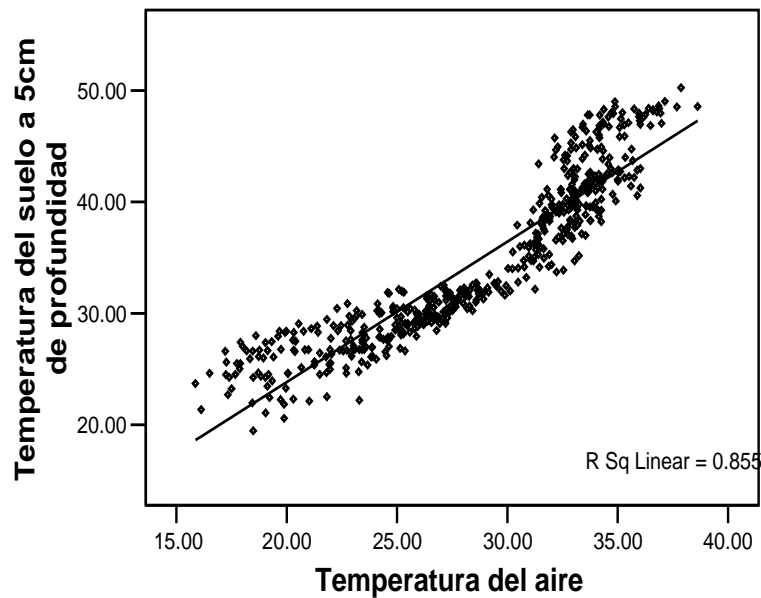


Fig. 4.8. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo I (de 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

La figura 4.9 muestra el estudio de correlación lineal aplicado a la temperatura del suelo a 2.0 cm con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad.

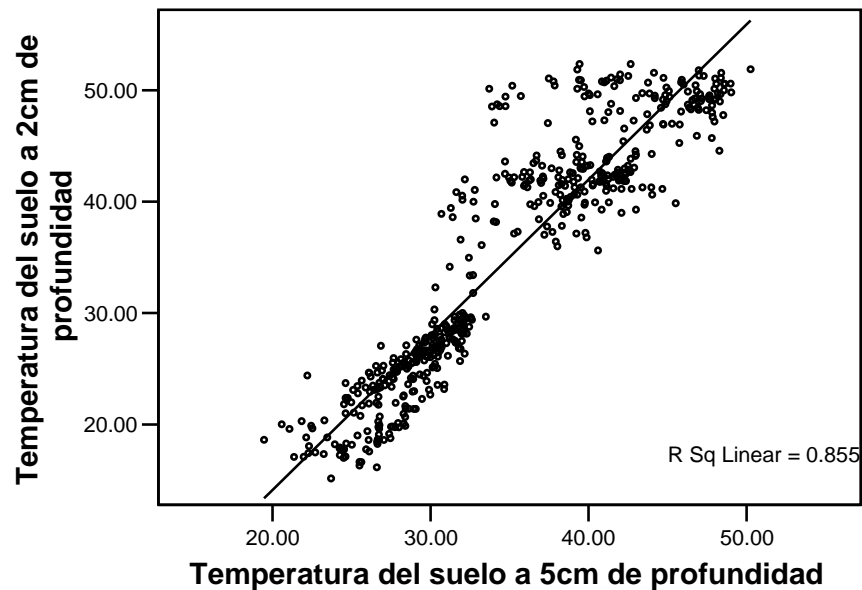


Fig. 4.9. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el periodo I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

El estudio de correlación lineal mostrado en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se realizaron con fundamento en lo observado en el estudio de las marchas diarias, mensuales y anuales de las variables en estudio de la sección 4.1, donde es evidente que existe una relación de dependencia entre la temperatura del aire y la temperatura de las capas superiores del suelo. En la tabla 4.1 se resumen los resultados de los estudios de correlación lineal aplicados para el período I.

Tabla 4.1. Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período I (estación seca I, del 01 de enero 2002 hasta el 17 de mayo 2002).

Variables correlacionas	Figura	R²
T (del suelo a 2.0 cm) – T (aire)	4.7	0.892
T (del suelo a 5.0 cm) – T (aire)	4.8	0.855
T (del suelo a 2.0 cm) – T (del suelo a 5.0 cm)	4.9	0.855

A partir de los datos de la tabla 4.1, se observa que la temperatura de las capas superficiales del suelo tiene una fuerte relación lineal con la temperatura del aire durante el primer período de estudio, ya que los coeficientes de correlación de dichos ajustes son mayores que 0.800.

La temperatura de las capas más profundas del suelo no se relacionan de manera lineal con la temperatura del aire para este mismo período, ya que los coeficientes de correlación de dichos ajustes son menores que 0.800. Por este motivo, no se presentan las gráficas respectivas en esta sección. Dichos resultados se pueden observar en el anexo 1.

4.2.2 Correlación lineal de las variables en estudio para el período II (Estación lluviosa I)

El estudio de correlación lineal para este período se realizó de igual manera que el aplicado a las variables en estudio para período I. El periodo II comprende del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002, y corresponde a la época lluviosa de ese año.

Las figuras 4.10 y 4.11 presentan el estudio de correlación lineal entre la temperatura del suelo a dos profundidades (2.0 cm y 5.0 cm) con la temperatura del aire.

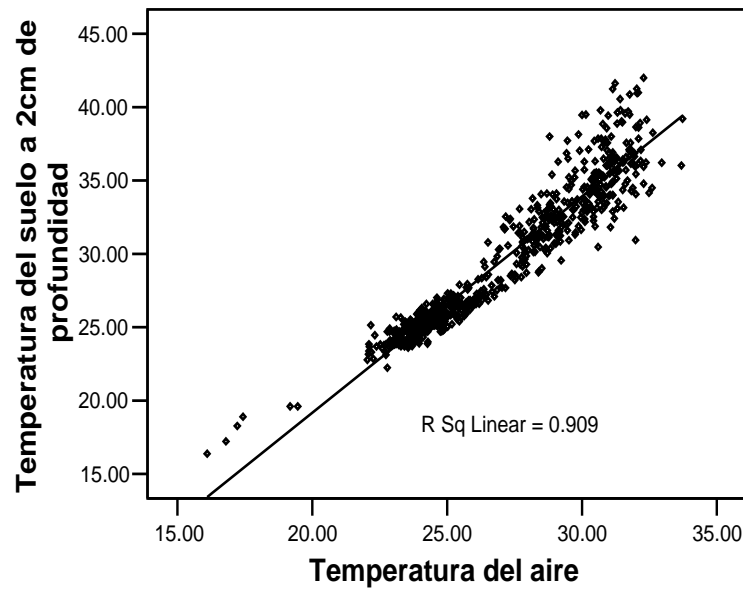


Fig. 4.10. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo II (del 18 de mayo hasta el 08 noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

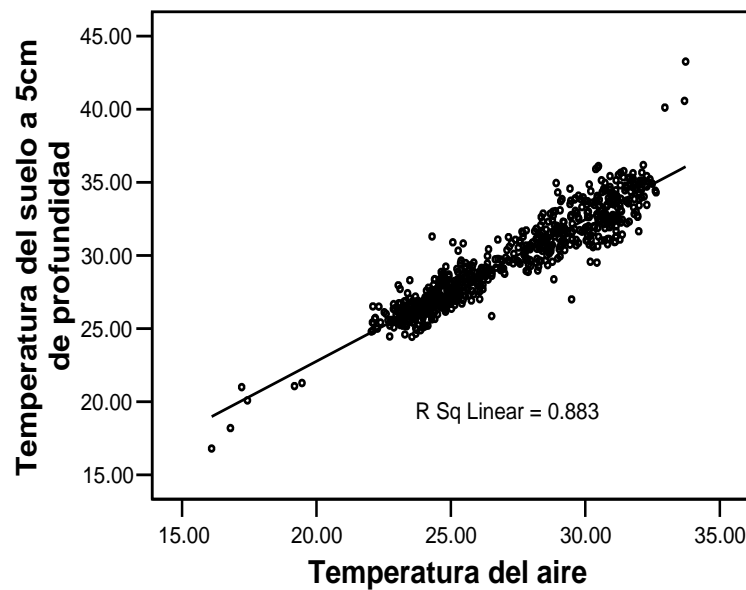


Fig. 4.11. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo II (del 18 de mayo hasta el 08 noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

La figura 4.12 muestra el estudio de correlación lineal aplicado a la temperatura del suelo a 2.0 cm con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad.

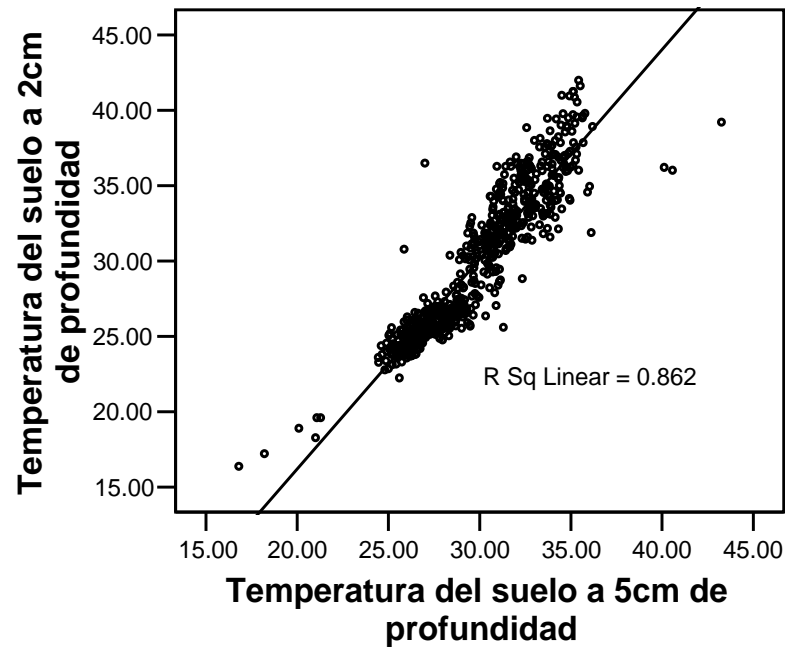


Fig. 4.12. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el período II (del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

En la tabla 4.2 se resumen los resultados de los estudios de correlación lineal aplicados para el período II. Esta tabla muestra las variables que tienen una fuerte dependencia lineal, según lo indican los coeficientes cuadrados de correlación lineal para cada ajuste.

Tabla 4.2. Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período II (estación lluviosa I, del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002)

Variabes correlacionas	Figura	R^2
T (del suelo a 2.0 cm) – T (aire)	4.10	0.909
T (del suelo a 5.0 cm) – T (aire)	4.11	0.883
T (del suelo a 2.0 cm) – T (del suelo a 5.0 cm)	4.12	0.862

A partir de los datos de la tabla 4.2, nuevamente se observa que la temperatura de las capas superficiales del suelo tiene una fuerte dependencia lineal con la temperatura del aire durante el segundo período de estudio, ya que los coeficientes de correlación de dichos ajustes son mayores

que 0.800. Esto es especialmente interesante por el incremento de la humedad en estas capas.

De igual manera, la temperatura de las capas más profundas del suelo no se relaciona de manera lineal con la temperatura del aire, como en el caso del primer período de estudio. Dichos resultados se pueden observar en el anexo 2.

4.2.3 Correlación lineal de las variables en estudio para el período III (Estación seca II)

El estudio de correlación lineal para este período se realizó de igual manera que el aplicado a las variables en estudio para los períodos anteriores. El periodo III comprende del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003, y corresponde a la segunda época seca.

Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 presentan el estudio de correlación lineal entre la temperatura del suelo a tres profundidades (2.0 cm, 5.0 cm y 10.0 cm) con la temperatura del aire.

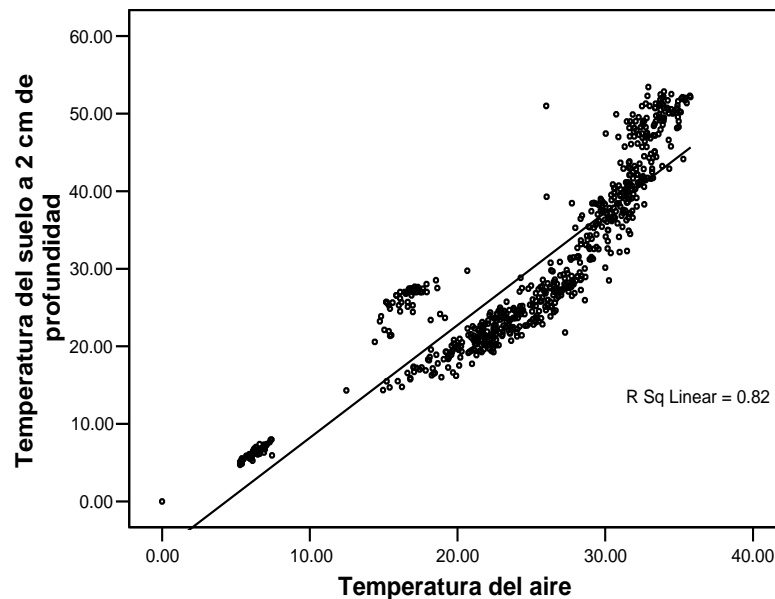


Fig. 4.13. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

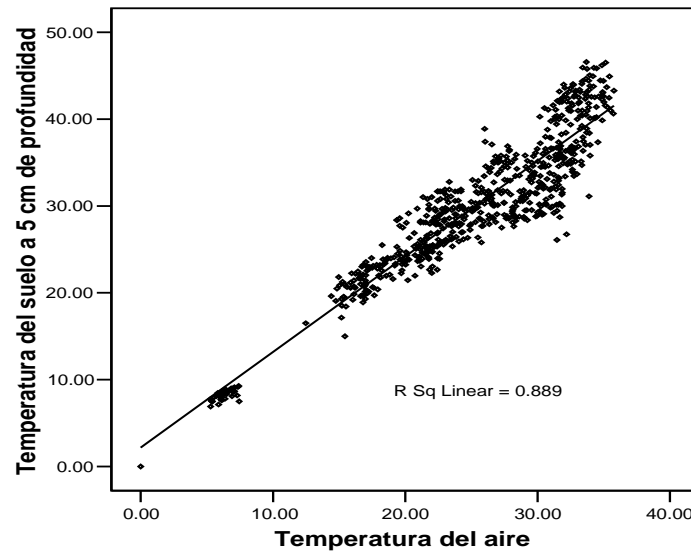


Fig. 4.14. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

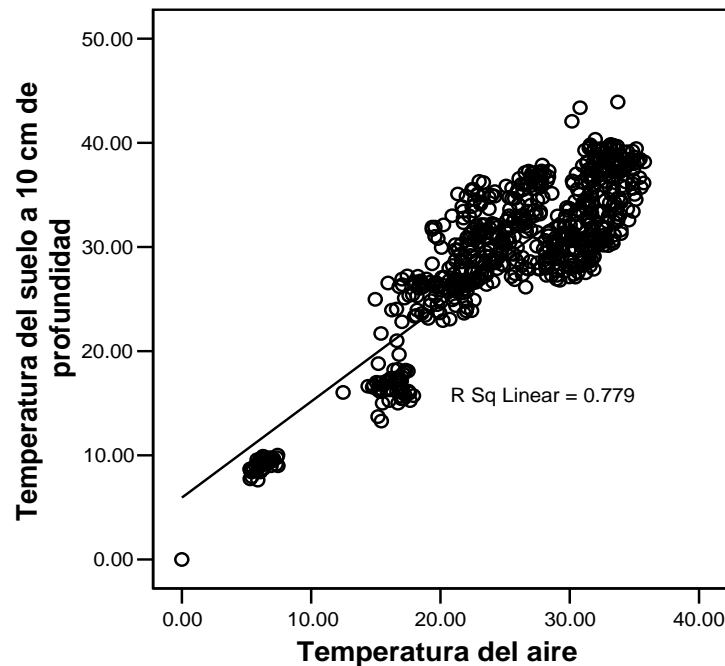


Fig. 4.15. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 10.0 cm de profundidad con la temperatura del aire para el periodo III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

La figura 4.16, 4.17 y 4.18 muestra el estudio de correlación lineal aplicado a las temperaturas del suelo a diferentes profundidades.

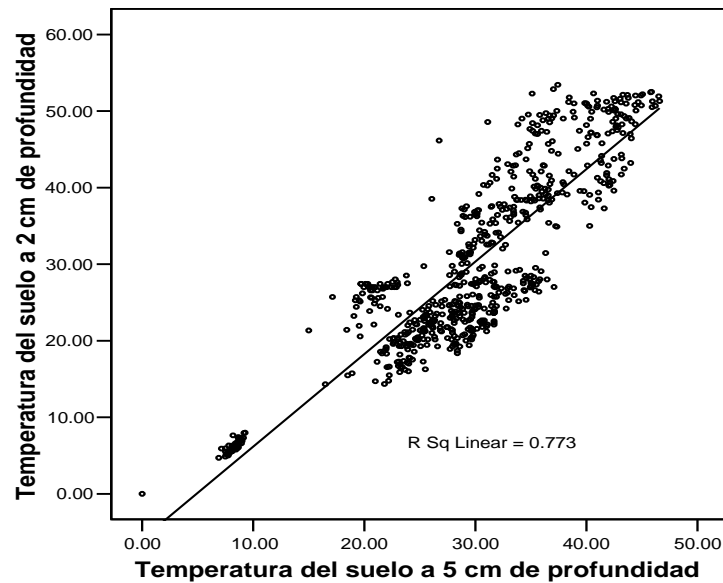


Fig. 4.16. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 2.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 5.0 cm de profundidad para el periodo III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

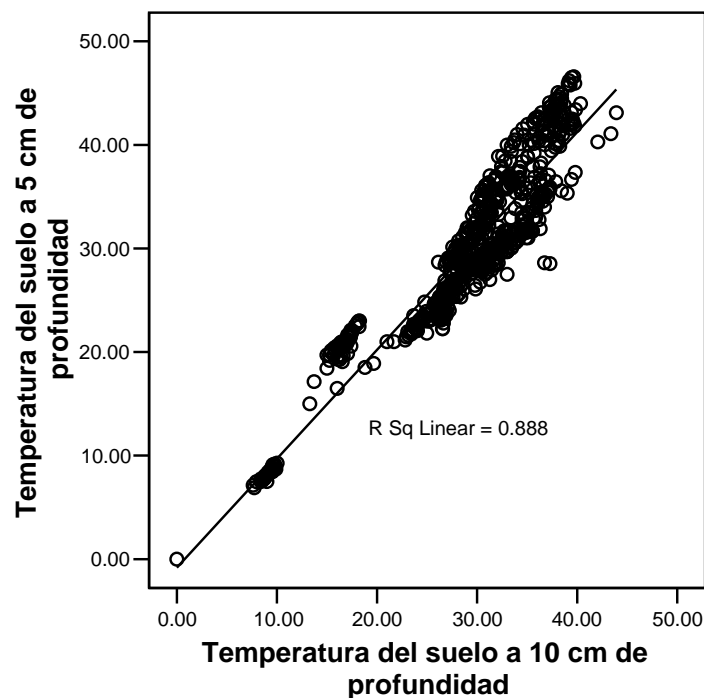


Fig. 4.17. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo (°C) a 5.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 10.0 cm de profundidad para el periodo III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de

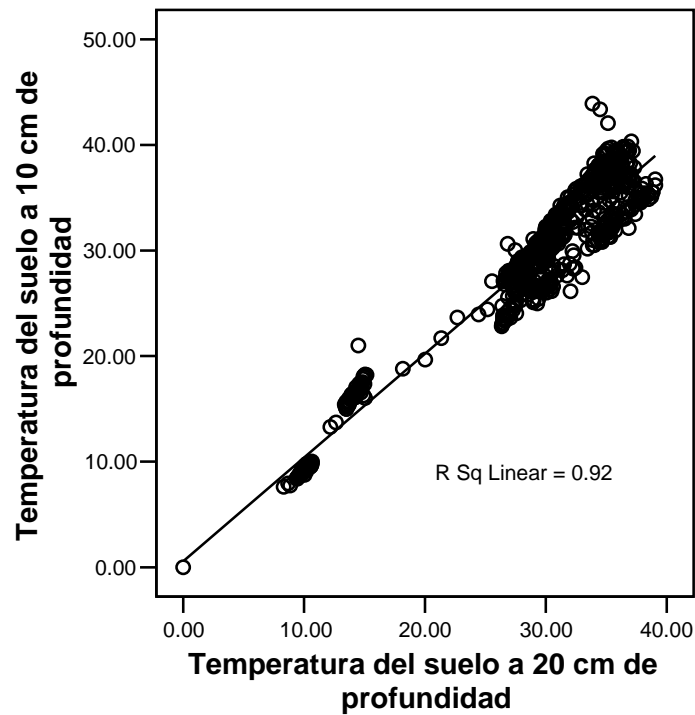


Fig. 4.18. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo ($^{\circ}\text{C}$) o a 10.0 cm de profundidad con la temperatura del suelo a 20.0 cm de profundidad para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de

En la tabla 4.3 se resumen los resultados de los estudios de correlación lineal aplicados para el período III. Esta tabla muestra las variables que tienen una fuerte dependencia lineal, según lo indican los coeficientes cuadrados de correlación lineal para cada ajuste.

Tabla 4.3. Coeficientes de correlación lineal obtenidos de los estudios de correlación lineal aplicados a la temperatura del suelo y a la temperatura del aire para el período III (estación seca II, del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003)

Variables correlacionas	Figura	R^2
T (del suelo a 2.0 cm) – T (aire)	4.13	0.820
T (del suelo a 5.0 cm) – T (aire)	4.14	0.880
T (del suelo a 10.0 cm) – T (aire)	4.15	0.779
T (del suelo a 2.0 cm) – T (del suelo a 5.0 cm)	4.16	0.770
T (del suelo a 5.0 cm) – T (del suelo a 10.0 cm)	4.17	0.888
T (del suelo a 10.0 cm) – T (del suelo a 20.0 cm)	4.18	0.920

La tabla 4.3 muestra, nuevamente, que la temperatura de las capas superficiales del suelo tiene una fuerte dependencia lineal con la temperatura del aire durante el tercer período de estudio, ya que los coeficientes de correlación de dichos ajustes son mayores que 0.800; aunque, para este período se observa una relación de dependencia lineal para algunas de variables de las capas profundas. Es de notar que hay dos ajustes que tienen un coeficiente cuadrado de correlación lineal con un valor menor que 0.800. El resto de gráficas que resultaron de este estudio pueden ser observadas en el anexo 3.

4.3 CÁLCULO DE LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA DEL SUELO

Para el caso de el lugar donde estaba ubicada la estación meteorológica de El Papalón se realizó la caracterización de las propiedades térmicas del suelo a partir de la determinación de la difusividad térmica K . Las consideraciones utilizadas para tal cálculo son las recomendadas en el modelo físico descrito en el capítulo 2.

La determinación de la difusividad es de especial utilidad para la selección y caracterización de materiales. Físicamente, describe como fluye el calor a través de un material específico. Cuanto mayor sea el valor de la difusividad térmica de una sustancia, más alto es el ritmo de propagación del flujo de calor; en cambio, cuanto menor sea el valor de la difusividad térmica, la sustancia tendrá una conducción de calor lenta. Lo anterior indica que la difusividad térmica de un material relaciona el flujo de energía con gradiente de temperatura.

En otras palabras, la difusividad térmica representa cuán rápido se propaga el calor a través de un material, por lo que representa la razón del calor conducido a través del material por unidad de volumen.

Ahora bien, para efectuar este análisis, resulta conveniente dividir el suelo en un número muy grande de capas de espesor ∂z cada una y, considerar que el calor fluye y se almacena en cada capa, de acuerdo con la ecuación 2.13, que en función de las características del suelo queda:

$$\rho_s c_s \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial G}{\partial z} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

Donde:

- ρ_s es la densidad del suelo,
- c_s es el calor específico del suelo,
- $\rho_s c_s$ es la capacidad calorífica volumétrica, y
- G es el flujo de calor por unidad de área en el suelo

Luego, a partir de la ecuación 2.10, se tiene que:

$$G = -k_s \frac{\partial T}{\partial z} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde k_s es la conductividad térmica del suelo. Sustituyendo la ecuación 4.2 en la ecuación 4.1, se obtiene una ecuación equivalente a la ecuación 2.14:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = K_s \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Donde K_s es la difusividad térmica del suelo. La ecuación 4.3 es la ecuación general que describe la velocidad con que varía la temperatura del suelo. En esta ecuación se ha considerado a k_s constante y que la difusividad térmica se calcula a partir de la ecuación 2.8.

Si el suelo se supone infinitamente profundo con propiedades térmicas uniformes y una temperatura que varía en la superficie de acuerdo a la ecuación 2.15,

$$T(0, t) = T_{med} + T_0 \sin[\omega t + \phi_0]$$

Entonces, la temperatura del suelo a cualquier profundidad y en cualquier instante está dada por la ecuación 2.16:

$$T(z, t) = T_{med} + T_0 e^{-z/D} \sin\left[\omega t - \frac{z}{D} + \phi_0\right]$$

Donde:

- ϕ_0 es un ángulo de fase que depende de si t es el tiempo local u otra referencia,
- T_{med} es la temperatura media de un ciclo,

- T_0 es la amplitud de la fluctuación en temperatura (la mitad de la referencia entre la máxima y mínima),
- ω es la frecuencia angular, dada por $\omega = \frac{2\pi}{\tau}$ con τ como el período de la fluctuación en temperatura. Puesto que se utilizaron los datos tomados diariamente, el período del ciclo considerado es de 24 h; luego $\omega_{diurno} = 7.27 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

El valor de la difusividad térmica del suelo K_s se calculó a partir de las ecuaciones 3.3 y 3.4, siguiendo el procedimiento siguiente: **Primero**, se obtuvo su valor para cada mes del período completo de estudio, utilizando los datos de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades de medida. Esto es, para las horas de registro I y II (7:00 a.m. y 2:00 p.m.) y para las profundidades correspondientes a las capas superficiales del suelo (2.0 cm y 5.0 cm). **Segundo**, se calculó su valor para estas mismas horas pero, para las profundidades correspondientes a las capas internas del suelo (10.0 cm y 20.0 cm). **Tercero**, se repitieron los cálculos descritos anteriormente para las horas de registro II y III.

El procedimiento utilizado garantiza la inclusión de todos los valores de temperatura que constituyen la base de datos y, proporciona una cantidad considerable de valores de K_s que permiten observar con mayor detalle su comportamiento a lo largo del período completo de estudio. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.4.

A partir de los datos de la tabla, se obtiene el valor de la difusividad térmica para todo el período de estudio con su respectiva incertidumbre absoluta, resultado:

$$K_s \pm \Delta K_s = (0.22 \pm 0.04) \text{ cm}^2/\text{s}$$

Tabla 4.4. Cálculo de la difusividad térmica de suelo a partir de los datos de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada mes del periodo de estudio. Las casillas marcadas con (*) indican que no se tenían valores disponibles para efectuar el cálculo.

		K _S (cm ² /s) para 2.0 cm y 5.0 cm			K _S (cm ² /s) para 10.0 cm y 20.0 cm			K _S (cm ² /s) Promedio por mes
No	Mes	Horas I y II	Horas II y III	Prom.	Horas I y II	Horas II y III	Prom.	
		K ₁	K ₂		K ₃	K ₄		
1	ene-02	0.2444	0.3877	0.3160	0.2837	0.1912	0.2374	0.2846
2	feb-02	0.1267	0.2500	0.1884	0.4139	0.4016	0.4077	0.2761
3	mar-02	0.1519	0.2110	0.1814	0.3135	0.0527	0.1831	0.1821
4	abr-02	0.2578	0.1658	0.2118	0.3011	0.2665	0.2838	0.2406
5	may-02	0.0817	0.2351	0.1584	0.4048	0.2172	0.3110	0.2194
6	jun-02	0.1374	0.1913	0.1644	0.1665	0.1750	0.1708	0.1669
7	jul-02	0.1975	0.1428	0.1701	0.3863	0.0456	0.2160	0.1885
8	ago-02	0.0931	0.1391	0.1161	0.3784	0.1442	0.2613	0.1742
9	sep-02	0.0897	0.4057	0.2477	0.3719	0.0281	0.2000	0.2286
10	oct-02	0.1542	0.8114	0.4828	0.2788	0.0359	0.1574	0.3526
11	nov-02	0.1457	0.2951	0.2204	0.1788	0.1379	0.1583	0.1956
12	dic-02	0.2203	0.1408	0.1805	0.2313	0.1519	0.1916	0.1849
13	ene-03	0.1916	0.1506	0.1711	0.2433	0.1868	0.2150	0.1887
14	feb-03	0.1641	(*)	0.1641	0.2762	(*)	0.2762	0.2015
15	mar-03	0.1960	0.2014	0.1987	0.2771	0.1316	0.2043	0.2010
16	abr-03	0.2436	0.1331	0.1883	0.3329	0.2177	0.2753	0.2231

La figura 4.16 muestra de manera gráfica la variación de los promedios mensuales de la difusividad térmica del suelo, así como el comportamiento de esta magnitud para dos horas de registro y para dos profundidades. Es de notar que tanto la difusividad térmica calculada para las capas superficiales y la calculada para las capas profundas se comportan de una forma sinusoidal en función del tiempo, ambas con un período de 4 meses, y después de cada período sus valores coinciden. Otro detalle importante que se debe observar es que el valor de la difusividad térmica para los meses de febrero-marzo de 2002 y febrero-marzo de 2003 son similares para las capas

superficiales (2.0 cm y 5.0 cm), lo anterior también se cumple para las más profundas (10.0 cm y 20.0 cm); observándose también que la difusividad alcanza el máximo entre los meses de septiembre y octubre de 2002 en las capas superficiales.

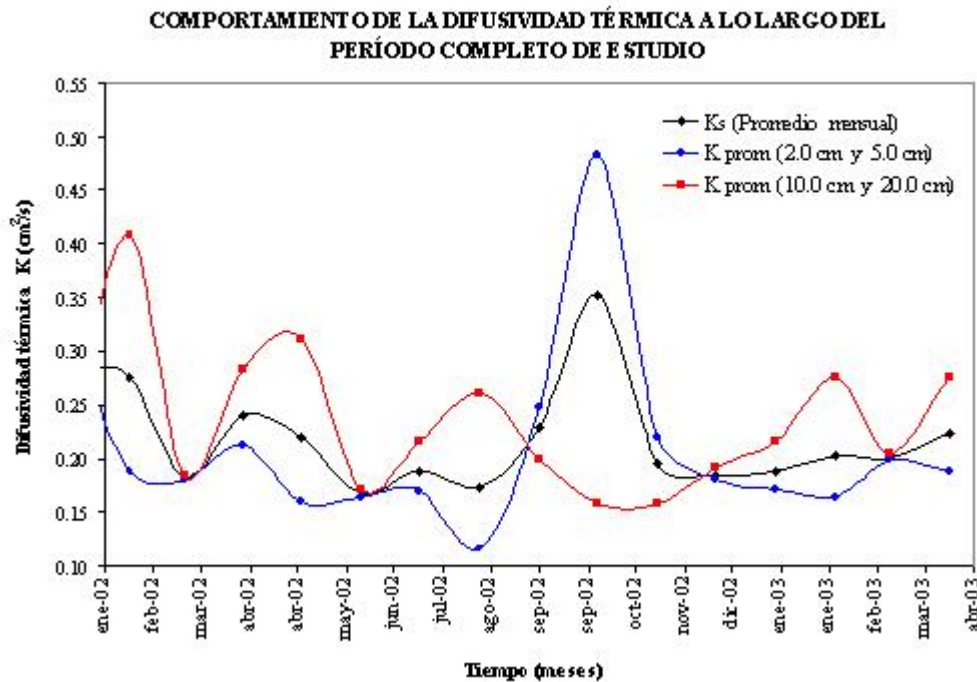


Fig. 4.19. Comportamiento de la difusividad térmica del suelo en función del tiempo, calculada a partir de valores de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada mes del período de estudio completo (del 01 de enero de 2002 hasta el 30 de abril de 2003)

Otro resultado de especial interés para la presente investigación consistió en calcular los valores de la difusividad térmica del suelo por época de estudio, para dos horas de registro y para dos profundidades. Estos valores se muestran en la tabla 4.5. Se observa que para el periodo I (época seca I), el valor promedio de la difusividad térmica es $0.2571 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 17.2% con respecto al promedio del período completo. Para el período II (época lluviosa I), su valor promedio es $0.2066 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.8% con respecto al promedio del período completo. Finalmente, para el periodo III (época seca II), la difusividad térmica tiene un valor promedio de $0.2071 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.6% con respecto al promedio del período completo.

Tabla 4.5. Cálculo de la difusividad térmica de suelo a partir de los datos de temperatura para dos horas de registro y para dos profundidades, por cada período de estudio.

	K_S (cm²/s) para 2.0 cm y 5.0 cm			K_S (cm²/s) para 10.0 cm y 20.0 cm			K_S (cm²/s) Promedio por período
Período de estudio	Horas I y II	Horas II y III	Prom.	Horas I y II	Horas II y III	Prom.	
	K₁	K₂		K₃	K₄		
I	0.1868	0.2701	0.2284	0.3382	0.2333	0.2857	0.2571
II	0.1221	0.3095	0.2158	0.3118	0.0831	0.1975	0.2066
III	0.2015	0.1852	0.1934	0.2633	0.1783	0.2208	0.2071

Es de notar que, según los datos mostrados en la tabla 2.1, el suelo que se utilizó para construir la base de datos que se ha utilizado en la presente investigación, es un suelo con un contenido alto de aire y mucha movilidad, lo que significa que es un suelo con una por

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presentan una interpretación de los resultados obtenidos del análisis de los datos de temperatura presentados en el capítulo 4, así como algunas recomendaciones pertinentes que deberían ser consideradas para acelerar el desarrollo del área científica en la que se enmarca la presente investigación.

4.1 CONCLUSIONES

A partir de los resultados presentados en el capítulo 4, se puede concluir que:

1. La variación de la temperatura en el suelo depende fuertemente de la hora del día y de la profundidad. Debe recordarse que a medida que avanza el día, la radiación solar incidente va incrementándose, y por lo tanto, la dirección del flujo de calor entre la atmósfera y el suelo sufre intermitencias, del suelo a la atmósfera y viceversa.
2. El suelo tiene una capacidad calorífica alta, lo que significa que es un buen acumulador de calor, y una baja conductividad térmica que hace que su calentamiento sea lento al igual que su enfriamiento. El proceso de intercambio de calor está influenciado fuertemente por las propiedades térmicas del suelo, a saber, la capacidad calorífica, la conductividad térmica y la difusividad térmica, que a su vez dependen de las características físicas del propio suelo y de su contenido de agua (humedad).
3. Las modificaciones más considerables en las marchas de temperatura, a lo largo del período de estudio se presentan en los meses de transición entre las estaciones seca-lluviosa-seca.
4. Se producen los incrementos de temperatura en la capa superficial e intermedia del suelo a lo largo del día. Es de notar que es a 2.0 cm de profundidad es donde aparece el incremento más drástico, y es muy similar al que sufre el aire. Para la capa más profunda (20.0 cm) no sucede lo mismo, pues la temperatura permanece cuasi-invariables a lo largo del día. Esto se debe al

incremento de la radiación térmica incidente por la mañana y, la disminución que se produce en el atardecer.

5. La temperatura de las capas superficiales del suelo (2.0 cm y 5.0 cm) tiene una fuerte dependencia lineal con la temperatura del aire durante todo el período de estudio. Además, las temperaturas del suelo en las capas a 2.0 cm y 5.0 cm de profundidad, también presentan una fuerte dependencia lineal.
6. El valor de la difusividad térmica del suelo para todo el período de estudio, es $(0.22 \pm 0.04) \text{ cm}^2/\text{s}$. Este valor indica que el suelo que se utilizó para construir la base de datos de temperatura es un suelo con un contenido alto de aire y mucha movilidad, lo que significa que es un suelo con una porosidad muy elevada.
7. Los resultados sugieren que la difusividad térmica del suelo no es constante, se ve afectada por la hora del día, la profundidad en el suelo y por la época del año. Esta magnitud tiene un comportamiento sinusoidal en función del tiempo, con un período de 4 meses. Esto se cumple para las capas superficiales y para las profundas, con un desfase de medio ciclo (2 meses).
8. La difusividad térmica alcanza su máximo en la etapa final la época lluviosa (septiembre-octubre). Esto puede deberse a que en este período, el contenido de agua acumulada en el suelo es mayor que a lo largo de toda época lluviosa; esto modifica tanto la conductividad térmica y la densidad como el calor específico del suelo.
9. La difusividad térmica del suelo varía con la época del año, con un grado de dispersión considerable respecto al valor promedio para todo el período de estudio. Se observa que para la época seca I, el valor promedio de la difusividad térmica es $0.2571 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 17.2%; para la época lluviosa I, su valor promedio es $0.2066 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.8%; y para la época seca II, tiene un valor promedio de $0.2071 \text{ cm}^2/\text{s}$ con una diferencia relativa porcentual de 5.6%.
10. El modelo físico utilizado en esta investigación, describe de forma adecuada el comportamiento de las variables en y, parece funcionar a lo largo de todo el año.

4.2. RECOMENDACIONES

Algunas recomendaciones que se consideran pertinentes y que, deberían ser consideradas con mucha seriedad en la Universidad de El Salvador, son las siguientes:

1. Continuar los estudios en esta área del conocimiento científico, en especial, los estudios de caracterización física y climatológica de los suelos de las distintas microrregiones y regiones del país, en especial los suelos de la Región Oriental.
2. Extender la caracterización física y climatológica del suelo al estudio de otras variables, como la humedad, la precipitación, el flujo de agua y aire en el suelo, etc. para construir un modelo físico local de su comportamiento y de su relación con la atmósfera.
3. Determinar la bondad del método usado para calcular la difusividad térmica de suelo, comparándolo con otros métodos que permitan el mismo cálculo.

Investigar la relación concreta entre las variables que caracterizan el intercambio térmico entre el suelo y la atmósfera con el uso agrícola dado al suelo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Inzunza, J. (2002). Principios de Microclimatología. Concepción de Chile, Chile.
<http://www2.udec.cl/~jinzunza/biofisica/unidad6.pdf>
- [2] <http://www.monografias.com/trabajos14/deforestacion/deforestacion.shtml>
- [3] Transferencia de Calor,
http://www.fisicanet.com.ar/fisica/f2ap03/apf2_16h_Transferencia_de_Calor.php
- [4] Protocolo de Kioto, <http://www.vitalis.net/actualidad152.htm#protocolo>. Kioto
- [5] <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/meteoro/leccion2.pdf>
- [6] http://www.biocab.org/Transferencia_Calor.html
- [7] <http://mail.snet.gob.sv/Hidrologia/Documentos/CClimaticoELS>.
- [8] Graedel, T. E.; Crutzen, Paul J. (1993). Atmospheric Change. An Earth System Perspective. 1a Edición. W. H. Freeman and Company. New York.
- [9] Centella, A.; Castillo, L.; Aguilar, A. (1998). Escenarios climáticos de referencia para la República de El Salvador. PNUD ELS97G32, San Salvador, El Salvador.
- [10] Erazo Chica, A. M. Investigadora Hidróloga. Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET. Variaciones hidroclimáticas o evidencias de cambio climático en El Salvador.
- [11] Erazo, A.; Rivas, T.; Hernández, O.; Rivas, C.; Jaimes, I. (2002). Servicio Nacional de Estudios Territoriales SNET. Comportamiento hídrico en El Salvador, causas e implicaciones. El Salvador.
- [12] Wikipedia, La enciclopedia libre. (2006) *Balance radiativo terrestre*.
http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=Balance_radiativo_terrestre&oldid=366835
- [13] Abramowitz, M. and Stegun, I. E. Handbook of mathematical functions, chap. 9, pp. 359–389, U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1972. 5

- [14] Bear, J., and Bensabat, J. (1991). Heat and mass transfer in unsaturated porous media at a hot boundary: I. one-dimensional analytical model, *Transport in Porous Media*, 6, 281–298.
- [15] Chen, D., and Kling, J. (1996). Apparent thermal diffusivity in soil: Estimation from thermal records and suggestions for numerical modeling, *Physical Geography*, 17, 419–430.
- [16] De Vries, D. A., and Afgan, N. H. (1975). *Heat and mass transfer in the biosphere*, John and Wiley Sons.
- [17] Farouki, O. T. (1986). *Thermal properties of soils*, Series on Rock and Soil Mechanics.
- [18] Flühler, H., and Roth, K. (1999). *Bodenphysik - Physik der ungesättigten Zone*, Eidgenössische Technische Hochschule Zurich.
- [19] Hillel, D. (1982). *Introduction to soil physics*, Academic Press, Inc.

ANEXOS

ANEXO 1. Correlación lineal de las variables en estudio para el período I.

Como ya se mencionó en la sección 4.2.1, no en todos los análisis de correlación existe una relación de dependencia lineal entre algunas de las variables en estudio. Los resultados se muestran en las figuras A1.1, A1.2, A1.3 y A1.4.

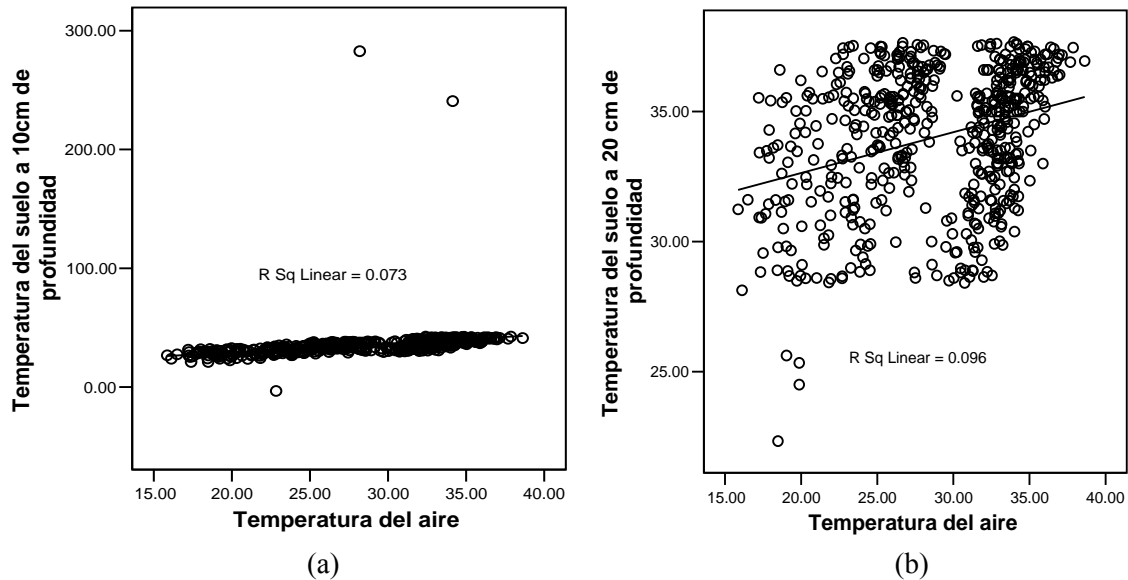


Fig. A1.1. Estudio de correlación lineal de la temperatura del aire con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período I (de 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

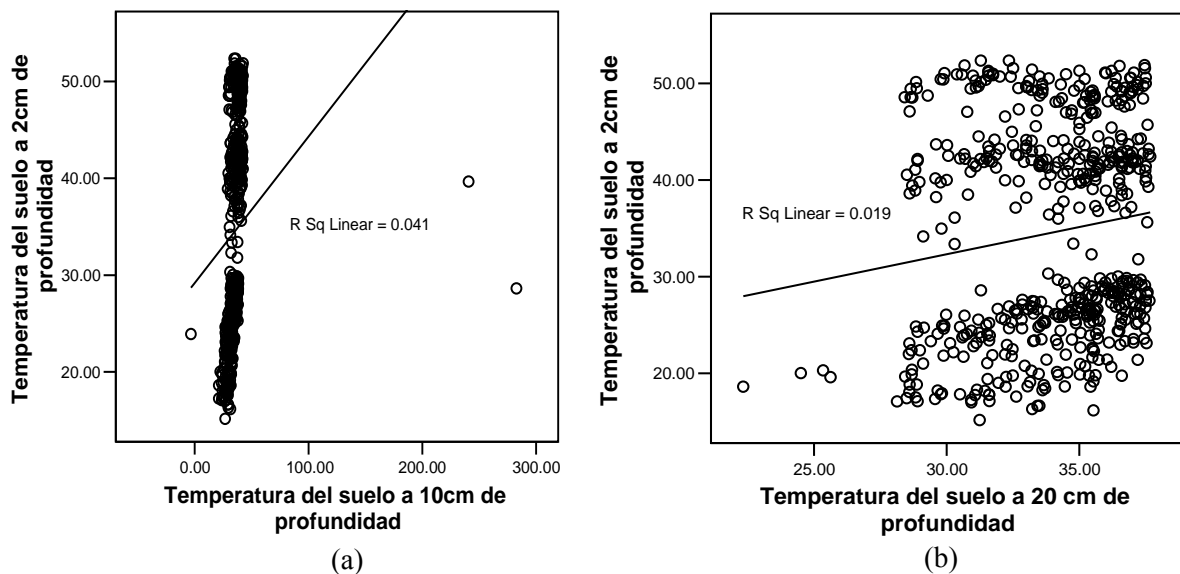


Fig. A1.2. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

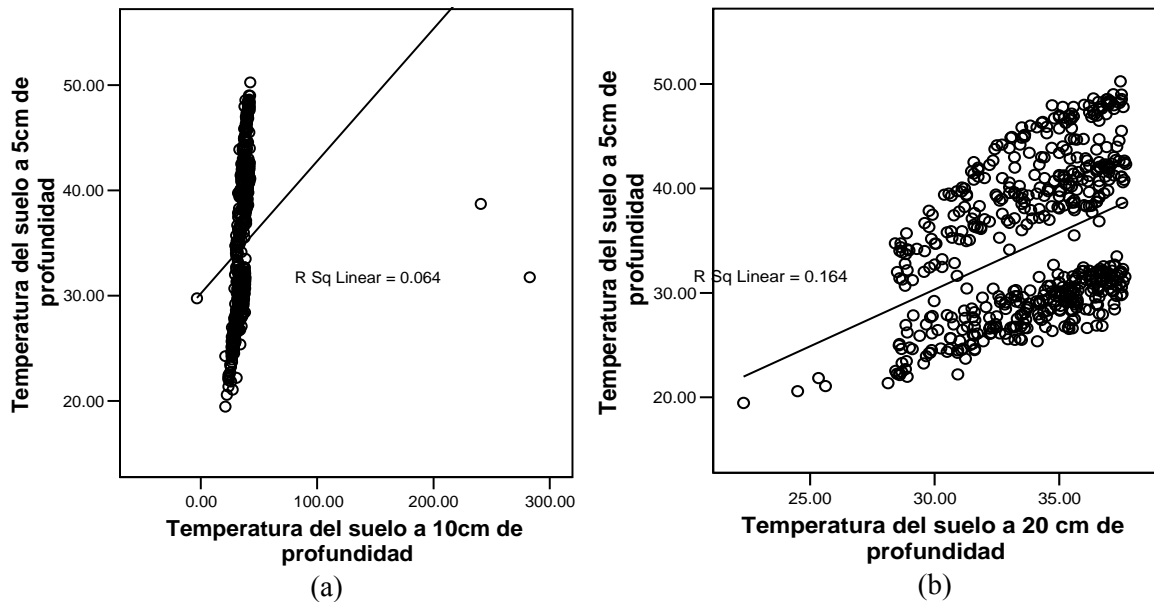


Fig. A1.3. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

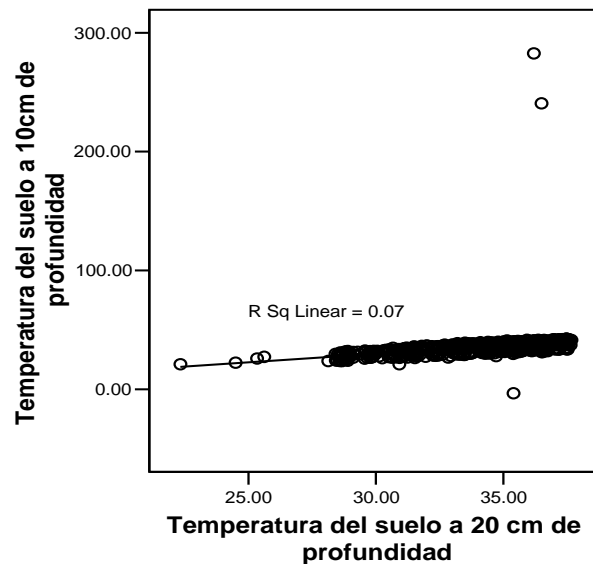


Fig. A1.4. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 10.0 cm con la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período I (del 01 de enero hasta el 17 de mayo de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

ANEXO 2. Correlación lineal de las variables en estudio para el período II.

Como ya se mencionó en la sección 4.2.2, no en todos los análisis de correlación existe una relación de dependencia lineal entre algunas de las variables en estudio. Los resultados se muestran en las figuras A2.1, A2.2, A2.3 y A2.4.

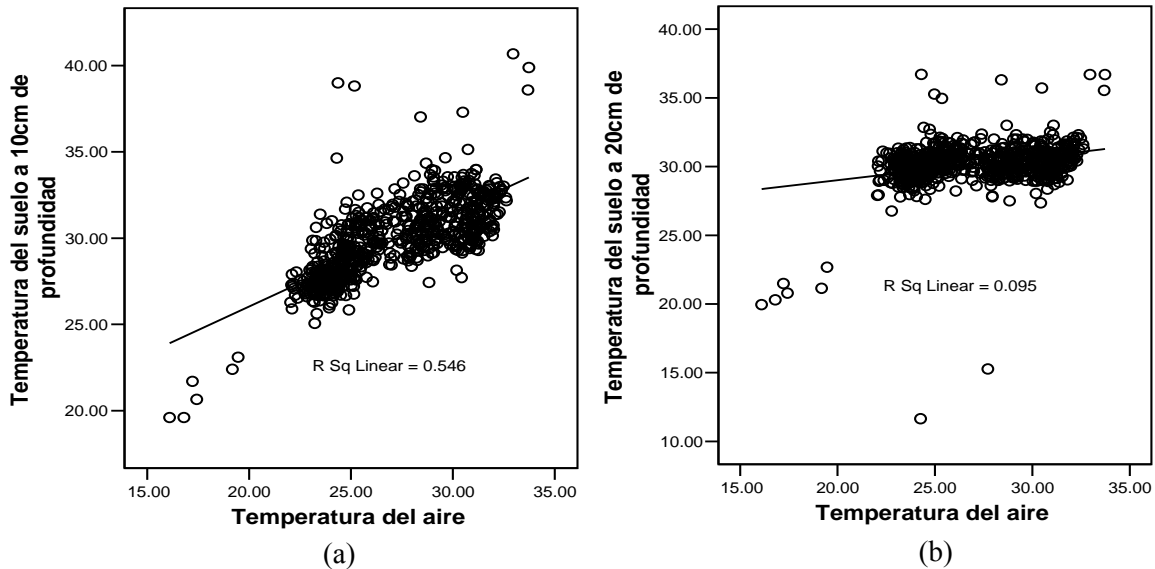


Fig. A2.1. Estudio de correlación lineal de la temperatura del aire con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período II (de 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

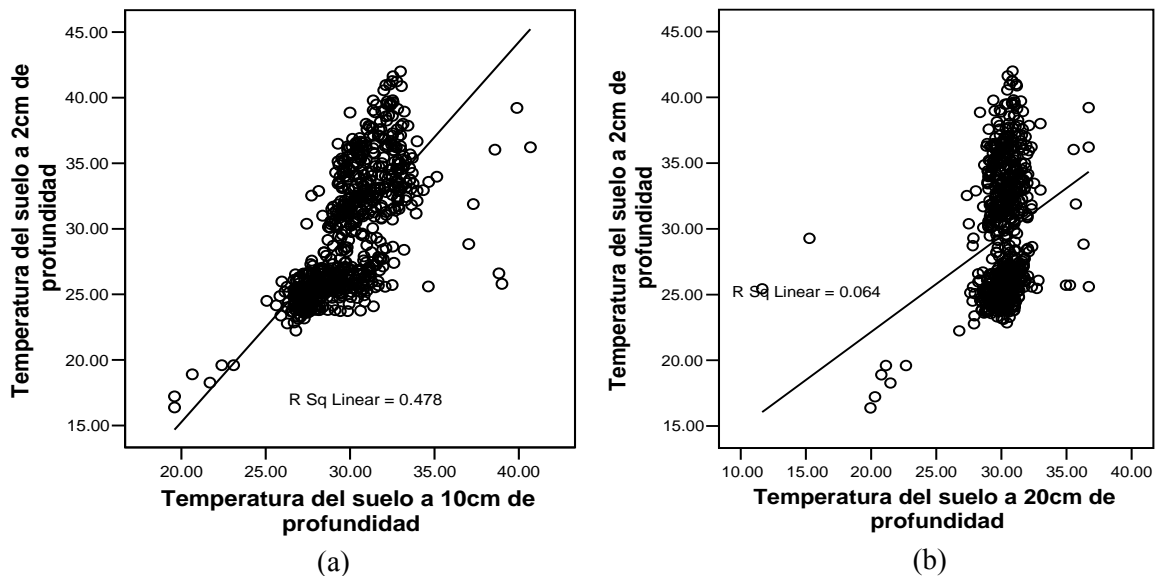


Fig. A2.2. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período II (del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

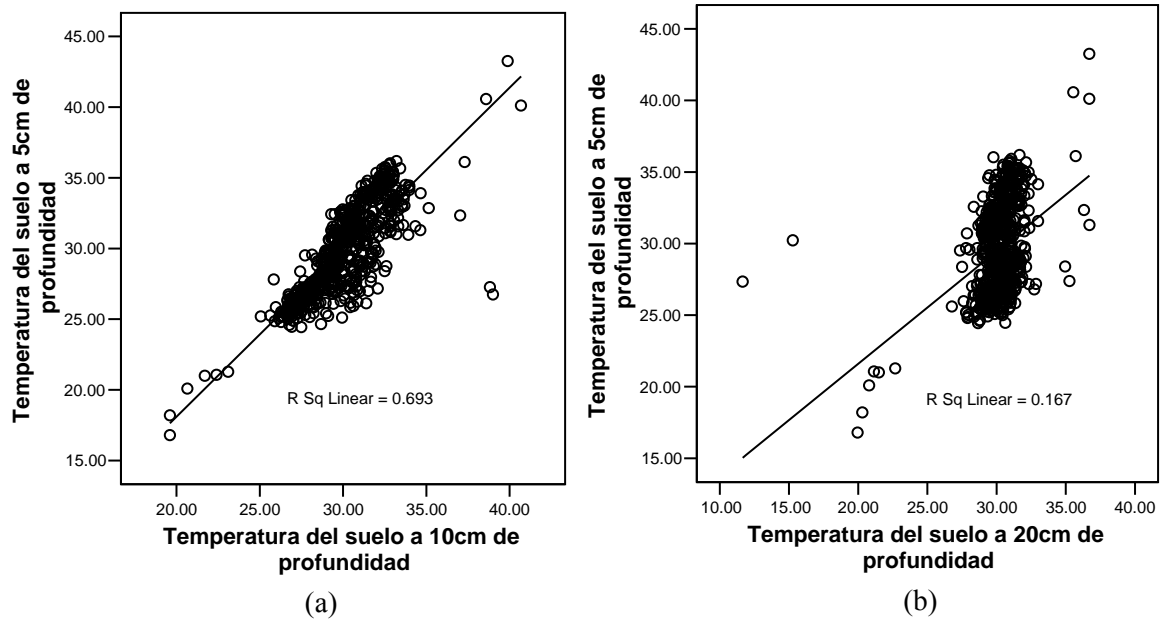


Fig. A2.3. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período II (del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

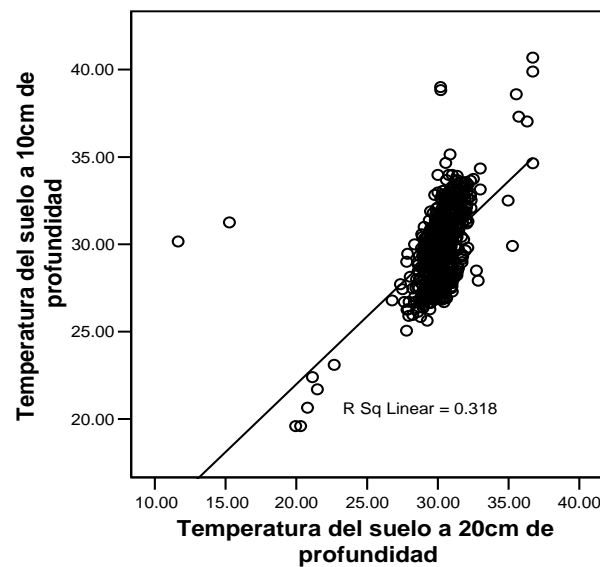


Fig. A2.4. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 10.0 cm con la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período II (del 18 de mayo hasta el 08 de noviembre de 2002). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

ANEXO 3. Correlación lineal de las variables en estudio para el período III.

Como ya se mencionó en la sección 4.2.3, no en todos los análisis de correlación existe una relación de dependencia lineal entre algunas de las variables en estudio. Los resultados se muestran en las figuras A3.1, A3.2 y A3.3.

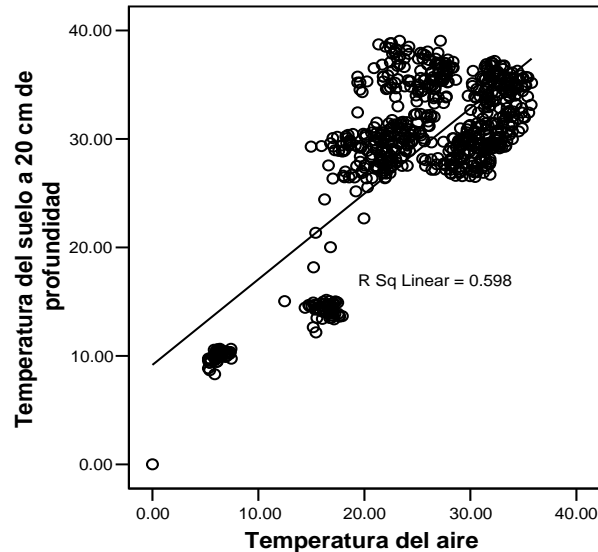


Fig. A3.1. Estudio de correlación lineal la temperatura del suelo a 20.0 con la temperatura del aire para el período III (de 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

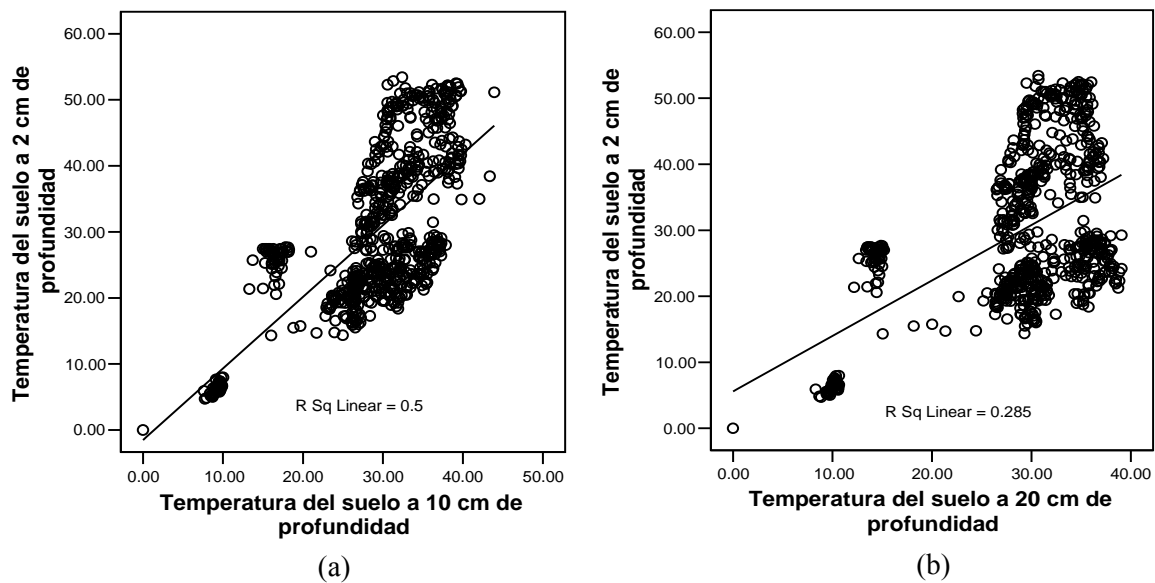


Fig. A3.2. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 2.0 cm con (a) la temperatura del suelo a 10.0 cm y, (b) la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

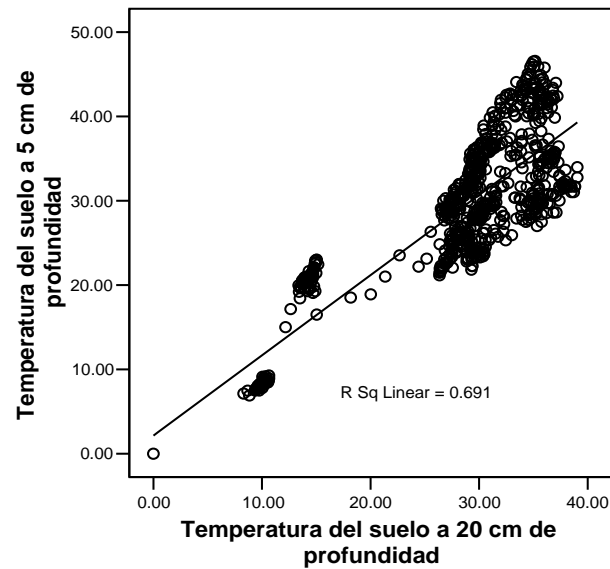


Fig. A3.3. Estudio de correlación lineal de la temperatura del suelo a 5.0 cm con la temperatura del suelo a 20.0 cm para el período III (del 09 de noviembre de 2002 hasta el 30 de abril de 2003). Se muestra la recta del ajuste con su respectivo coeficiente de correlación.

ANEXO 4. Cálculos de la difusividad térmica por mes.

MES: ENERO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	1,3092	0,0180	1,0932	0,1649	1,2306	0,3377	1,8994	0,0353
2								
3	0,2717	0,0008	0,1886	0,0005	0,8736	0,7963	1,2800	0,2386
4								
5	0,9643	0,9922	0,9167	0,1729	1,5054	0,0869	1,5062	0,0867
6								
7	0,6404	0,0066	0,5423	0,0035	1,2502	0,2916	1,3941	0,1317
8								
9	0,8306	0,0380	0,7304	0,0133	1,5945	0,0668	1,4136	0,1214
10								
11	0,9595	0,7666	1,1038	0,1341	1,3077	0,2020	1,1815	0,5228
12								
13	1,2078	0,0367	0,8881	0,0930	1,1501	0,7432	0,3859	0,0160
14								
15	0,7529	0,0162	0,7786	0,0209	2,0018	0,0302	3,2799	0,0103
16								
17	0,6006	0,0050	0,5193	0,0030	0,8924	1,1217	0,8789	0,8727
18								
19	1,2797	0,0215	1,0190	3,7095	0,6782	0,0965	0,4650	0,0248
20								
21	1,1332	0,0837	1,2932	0,0198	2,2303	0,0226	0,5898	0,0521
22								
23	1,0404	0,8327	1,0320	1,3229	1,4646	0,0999	0,8359	0,4527
24								
25	1,0453	0,6659	1,5261	0,0073	1,3469	0,1639	1,3856	0,1367
26								
27	0,8835	0,0853	0,8141	0,0309	1,3206	0,1880	0,7408	0,1615
28								
29	1,1230	0,0972	1,1109	0,1182	0,2658	0,0083	0,1479	0,0040
30								
	K₁ prom.	0,2444	K₂ prom.	0,3877	K₃ prom.	0,2835	K₄ prom.	0,1918

MES: FEBRERO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y₁	K₁	Y₂	K₂	Y₃	K₃	Y₄	K₄
31	0,9580	0,7112	0,9433	0,3843	0,8652	0,6937	2,4813	0,0176
1								
2	0,9287	0,2392	1,0696	0,2891	0,4477	0,0225	1,2208	0,3654
3								
4	1,1870	0,0445	1,1073	0,1260	1,4516	0,1047	0,5487	0,0404
5								
6	0,9088	0,1430	0,9576	0,6973	1,0722	2,9918	0,6348	0,0704
7								
8	0,5928	0,0048	0,4642	0,0022	0,4244	0,0198	0,1749	0,0048
9								
10	0,8179	0,0324	1,1354	0,0811	0,8538	0,5821	0,9452	4,5804
11								
12	1,0949	0,1590	1,1768	0,0494	0,7170	0,1314	0,7250	0,1406
13								
14	0,8927	0,1015	1,2111	0,0357	0,8328	0,4343	0,6715	0,0917
15								
16	0,8611	0,0585	1,0447	0,6851	1,4067	0,1249	2,1361	0,0252
17								
18	1,2157	0,0343	1,0901	0,1757	0,0824	0,0023	1,4408	0,1090
19								
20	0,9117	0,1531	1,0547	0,4612	0,7773	0,2292	0,0875	0,0025
21								
22	0,7294	0,0131	1,0574	0,4205	0,0424	0,0015	1,3781	0,1414
23								
24	0,6004	0,0050	0,5104	0,0029	0,5765	0,0479	0,4925	0,0290
25								
26	0,8753	0,0738	0,8864	0,0900	0,8281	0,4087	0,1467	0,0039
27								
	K₁ prom.	0,1267	K₂ prom.	0,2500	K₃ prom.	0,4139	K₄ prom.	0,4016

MES: MARZO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
28	0,7015	0,0104	0,8113	0,0299	0,4201	0,0193	3,0246	0,0119
1								
2	1,3851	0,0123	1,0701	0,2848	10,2400	0,0027	6,2525	0,0043
3								
4	0,9325	0,2681	1,0530	0,4910	0,6194	0,0634	0,6139	0,0611
5								
6	0,4717	0,0023	0,3862	0,0014	0,5034	0,0309	0,3832	0,0158
7								
8	0,9563	0,6543	0,9634	0,9389	1,3652	0,1500	1,4433	0,1080
9								
10	0,8754	0,0739	0,9217	0,1967	0,7717	0,2165	0,5407	0,0385
11								
12	0,5757	0,0043	0,4636	0,0022	0,8850	0,9744	0,3807	0,0156
13								
14	0,9306	0,2528	1,1354	0,0811	1,1952	0,4571	6,5552	0,0041
15								
16	0,6340	0,0063	0,6713	0,0082	0,3899	0,0164	0,1321	0,0035
17								
18	0,9212	0,1945	0,8844	0,0867	1,1483	0,7606	4,6797	0,0061
19								
20	0,9472	0,4449	0,6373	0,0064	1,3225	0,1861	0,6470	0,0767
21								
22	0,8841	0,0862	0,9441	0,3952	0,8551	0,5935	0,8139	0,3430
23								
24	1,0631	0,3494	1,0461	0,6439	1,1289	0,9890	4,4202	0,0066
25								
26	1,2822	0,0212	1,1825	0,0466	0,7743	0,2223	0,5389	0,0380
27								
28	1,2327	0,0299	1,1880	0,0441	1,2900	0,2242	1,7056	0,0510
29								
30	0,7689	0,0189	0,9005	0,1191	0,6944	0,1094	0,6104	0,0596
31								
	K₁ prom.	0,1519	K₂ prom.	0,2110	K₃ prom.	0,3160	K₄ prom.	0,0531

MES: ABRIL 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	0,9380	0,3195	0,8952	0,1068	0,7692	0,2112	1,1342	0,9165
2								
3	0,9617	0,8594	0,9353	0,2922	1,2395	0,3153	0,8367	0,4576
4								
5	0,8636	0,0608	0,7601	0,0174	0,8799	0,8889	1,6198	0,0625
6								
7	1,1238	0,0960	0,9610	0,8259	3,3809	0,0098	15,1358	0,0020
8								
9	1,6632	0,0051	1,8720	0,0033	1,4174	0,1195	1,1476	0,7672
10								
11	1,0391	0,8909	0,9629	0,9143	0,8726	0,7829	2,7778	0,0139
12								
13	0,8222	0,0341	1,2387	0,0286	1,4463	0,1068	1,1425	0,8193
14								
15	0,7306	0,0133	0,7498	0,0158	0,8086	0,3220	1,3885	0,1350
16								
17	1,0735	0,2602	1,1808	0,0474	1,2431	0,3070	0,8653	0,6950
18								
19	1,0387	0,9088	0,8108	0,0298	1,1453	0,7902	0,5521	0,0412
20								
21	1,0881	0,1834	1,1278	0,0905	0,7195	0,1341	0,4878	0,0282
22								
23	0,5888	0,0047	0,6979	0,0101	1,2347	0,3272	2,4931	0,0174
24								
25	0,4389	0,0019	0,4524	0,0021	0,3818	0,0157	0,4792	0,0269
26								
27	0,8529	0,0517	0,8866	0,0903	0,6599	0,0842	0,3180	0,0111
28								
29	1,0899	0,1767	1,3739	0,0130	1,4609	0,1012	7,2485	0,0037
30								
	K₁ prom.	0,2578	K₂ prom.	0,1658	K₃ prom.	0,3011	K₄ prom.	0,2665

MES: MAYO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	1,2525	0,0258	0,9627	0,9079	0,8682	0,7275	0,8811	0,9076
2								
3	1,1520	0,0654	1,0393	0,8799	0,8695	0,7437	0,4824	0,0274
4								
5	0,5259	0,0032	0,8094	0,0293	0,8375	0,4624	0,8683	0,7289
6								
7	1,0404	0,8351	0,9491	0,4798	0,8837	0,9513	1,1382	0,8673
8								
9	0,8943	0,1049	0,9367	0,3057	0,8501	0,5512	0,6031	0,0569
10								
11	0,8972	0,1113	1,0400	0,8513	0,7465	0,1701	0,6932	0,1083
12								
13	1,9496	0,0029	3,5650	0,0008	1,4325	0,1125	0,6182	0,0628
14								
15	3,5927	0,0008	3,2742	0,0009	2,4662	0,0178	5,7354	0,0048
16								
17	2,8401	0,0012	3,6361	0,0008	2,6413	0,0154	22,0491	0,0015
18								
19	1,2381	0,0287	1,1930	0,0420	3,5330	0,0091	92,7031	0,0007
20								
21	2,0952	0,0024	2,5089	0,0015	0,2170	0,0062	0,1074	0,0029
22								
23	0,5610	0,0039	1,3452	0,0149	0,8836	0,9498	7,7160	0,0035
24								
25	0,8209	0,0336	0,6408	0,0066	1,1396	0,8513	0,3117	0,0107
26								
27	0,6234	0,0059	0,6029	0,0051	0,8420	0,4916	1,1922	0,4704
28								
29	0,1459	0,0004	0,1116	0,0003	0,3350	0,0122	0,1379	0,0037
30								
	K₁ prom.	0,0817	K₂ prom.	0,2351	K₃ prom.	0,4048	K₄ prom.	0,2172

MES: JUNIO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
31	0,0101	0,0001	0,1670	0,0004	0,3096	0,0106	0,8622	0,6619
1								
2	1,1810	0,0473	1,0434	0,7261	1,5429	0,0773	0,2951	0,0098
3								
4	8,0741	0,0003	3,8072	0,0007	9,7700	0,0028	0,8738	0,7992
5								
6	1,6825	0,0048	1,2980	0,0192	0,7210	0,1358	0,2430	0,0073
7								
8	0,9078	0,1397	0,9547	0,6103	0,5692	0,0458	0,2729	0,0086
9								
10	0,9617	0,8589	1,8720	0,0033	0,3481	0,0131	6,2500	0,0043
11								
12	0,1326	0,0003	0,1922	0,0005	0,0269	0,0011	1,2361	0,3236
13								
14	0,8214	0,0338	0,6818	0,0089	0,8683	0,7290	0,2207	0,0064
15								
16	0,7183	0,0120	1,0381	0,9360	0,5777	0,0483	0,8521	0,5674
17								
18	1,7388	0,0043	2,4557	0,0016	1,8942	0,0356	65,2100	0,0008
19								
20	0,9623	0,8851	1,4642	0,0090	0,8762	0,8331	1,5245	0,0818
21								
22	1,1716	0,0522	1,0896	0,1778	1,2668	0,2600	2,7778	0,0139
23								
24	0,5868	0,0046	1,0701	0,2853	0,5791	0,0487	1,3889	0,1347
25								
26	1,3357	0,0156	1,4436	0,0097	1,2866	0,2289	12,8000	0,0022
27								
28	0,4853	0,0025	0,8808	0,0812	0,4849	0,0278	8,1633	0,0033
29								
	K₁ prom.	0,1374	K₂ prom.	0,1913	K₃ prom.	0,1665	K₄ prom.	0,1750

MES: JULIO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
30	0,9439	0,3925	0,7253	0,0127	1,2800	0,2386	0,0720	0,0021
1								
2	0,8210	0,0336	2,0024	0,0027	1,1483	0,7607	1,1765	0,5505
3								
4	0,8413	0,0438	1,1357	0,0808	0,8635	0,6747	0,5625	0,0439
5								
6	2,0928	0,0024	1,5838	0,0062	2,0571	0,0279	0,3699	0,0147
7								
8	0,6382	0,0065	1,1050	0,1312	0,7548	0,1838	0,2483	0,0075
9								
10	1,2595	0,0246	1,6274	0,0055	0,5625	0,0439	0,0049	0,0005
11								
12	0,9615	0,8492	0,8099	0,0294	0,8018	0,2979	0,1585	0,0043
13								
14	1,0474	0,6108	0,5986	0,0050	1,1626	0,6409	0,1800	0,0049
15								
16	7,0503	0,0003	14,5452	0,0002	3,4962	0,0093	40,1111	0,0011
17								
18	0,8662	0,0635	1,1184	0,1046	1,2620	0,2684	0,0031	0,0004
19								
20	0,7865	0,0227	1,0595	0,3915	0,7022	0,1164	6,5675	0,0041
21								
22	0,5379	0,0034	0,9433	0,3842	0,8727	0,7841	1,5625	0,0730
23								
24	0,8253	0,0355	0,8520	0,0510	0,8680	0,7257	0,1850	0,0051
25								
26	1,5075	0,0078	1,1286	0,0894	0,8362	0,4544	0,2964	0,0098
27								
28	0,9643	0,9916	0,9613	0,8399	1,1535	0,7134	0,1717	0,0047
29								
30	1,1441	0,0723	1,0979	0,1500	0,7824	0,2414	0,0800	0,0023
31								
	K₁ prom.	0,1975	K₂ prom.	0,1428	K₃ prom.	0,3863	K₄ prom.	0,0456

MES: AGOSTO 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	0,7761	0,0204	0,8947	0,1057	1,1745	0,5619	2,7027	0,0147
2								
3	0,8342	0,0398	0,9642	0,9827	1,1329	0,9341	1,2346	0,3275
4								
5	0,8178	0,0323	0,7213	0,0123	0,7305	0,1475	0,5725	0,0467
6								
7	2,9280	0,0011	2,6951	0,0013	1,4157	0,1203	0,8321	0,4303
8								
9	0,9334	0,2757	0,9619	0,8678	0,8191	0,3650	0,4425	0,0219
10								
11	1,3513	0,0144	1,6393	0,0054	1,1369	0,8830	1,1556	0,6956
12								
13	0,9609	0,8238	0,8429	0,0448	0,8733	0,7928	1,2607	0,2709
14								
15	1,9676	0,0029	3,1133	0,0010	1,3309	0,1780	8,1633	0,0033
16								
17	1,2667	0,0234	1,8754	0,0033	1,3522	0,1597	3,7365	0,0084
18								
19	0,7218	0,0123	0,5557	0,0038	0,8256	0,3960	0,2215	0,0064
20								
21	2,0144	0,0027	2,7114	0,0013	3,4106	0,0097	0,7400	0,1604
22								
23	0,6360	0,0064	0,4675	0,0023	0,8848	0,9698	0,5851	0,0506
24								
25	0,8838	0,0858	1,1761	0,0497	0,5697	0,0459	2,2222	0,0228
26								
27	1,8286	0,0036	2,6317	0,0014	1,9513	0,0325	2,7778	0,0139
28								
29	1,1714	0,0523	0,5757	0,0043	1,5311	0,0801	0,6690	0,0900
30								
	K₁ prom.	0,0931	K₂ prom.	0,1391	K₃ prom.	0,3784	K₄ prom.	0,1442

MES: SEPTIEMBRE 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
31	2,1656	0,0022	1,9742	0,0028	1,8978	0,0354	1,3943	0,1316
1								
2	0,9226	0,2017	1,6289	0,0055	0,8858	0,9890	11,3906	0,0025
3								
4	0,4169	0,0017	0,8676	0,0648	0,8751	0,8171	9,0069	0,0030
5								
6	1,0728	0,2652	1,0685	0,2985	1,7313	0,0483	6,2500	0,0043
7								
8	0,4727	0,0023	0,5105	0,0029	7,0778	0,0038	8,0000	0,0034
9								
10	2,1367	0,0023	1,5664	0,0065	1,2887	0,2261	0,0977	0,0027
11								
12	0,7898	0,0235	0,4432	0,0020	0,8796	0,8841	0,1153	0,0031
13								
14	0,7505	0,0159	0,5314	0,0033	0,8848	0,9707	2,6990	0,0147
15								
16	1,4274	0,0103	0,7359	0,0139	1,6582	0,0569	0,1684	0,0046
17								
18	1,0839	0,2015	1,3890	0,0121	2,0211	0,0294	0,5150	0,0330
19								
20	9,4522	0,0003	4,8991	0,0005	3,1310	0,0112	3,9900	0,0076
21								
22	2,3301	0,0018	1,5972	0,0060	2,0722	0,0274	1,6753	0,0546
23								
24	1,0510	0,5298	1,0488	0,5755	0,8431	0,4991	0,7031	0,1172
25								
26	0,7914	0,0239	1,0164	4,9608	0,8817	0,9180	0,1753	0,0048
27								
28	0,8656	0,0628	1,1055	0,1300	0,6155	0,0617	1,9300	0,0336
29								
	K₁ prom.	0,0897	K₂ prom.	0,4057	K₃ prom.	0,3719	K₄ prom.	0,0281

MES: OCTUBRE 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
30	3,3526	0,0009	3,7951	0,0007	1,4108	0,1228	0,6803	0,0979
1								
2	1,1714	0,0523	1,0612	0,3708	0,8832	0,9429	0,6612	0,0849
3								
4	1,0750	0,2500	0,7714	0,0194	1,1447	0,7964	0,2468	0,0074
5								
6	0,8650	0,0622	0,9897	12,1987	0,8692	0,7402	0,4982	0,0300
7								
8	1,1260	0,0930	1,0781	0,2315	1,3015	0,2093	1,8587	0,0378
9								
10	0,9519	0,5380	0,8648	0,0620	1,4805	0,0944	0,3744	0,0151
11								
12	1,2410	0,0281	1,3425	0,0151	1,2042	0,4213	0,6531	0,0801
13								
14	1,2623	0,0241	1,8334	0,0036	1,3829	0,1384	31,0345	0,0012
15								
16	2,2476	0,0020	1,6722	0,0050	8,5000	0,0032	2,3111	0,0207
17								
18	0,7130	0,0114	0,3394	0,0011	2,8783	0,0130	2,7022	0,0147
19								
20	0,9195	0,1858	1,3395	0,0153	0,7487	0,1736	2,7705	0,0140
21								
22	0,8958	0,1081	0,7537	0,0164	1,3872	0,1358	0,2722	0,0086
23								
24	0,9595	0,7646	1,2591	0,0247	1,6308	0,0608	1,3642	0,1507
25								
26	1,0913	0,1716	1,6071	0,0058	0,8375	0,4626	9,2035	0,0030
27								
28	0,9079	0,1401	0,6529	0,0072	1,4444	0,1075	0,1850	0,0051
29								
30	0,8240	0,0349	1,5977	0,0060	1,8521	0,0383	7,0796	0,0038
31								
	K₁ prom.	0,1542	K₂ prom.	0,8114	K₃ prom.	0,2788	K₄ prom.	0,0359

MES: NOVIEMBRE 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	0,7609	0,0175	0,9504	0,5057	1,2209	0,3650	6,3774	0,0042
2								
3	1,1315	0,0857	1,2108	0,0358	6,2720	0,0043	1,3000	0,2112
4								
5	0,3469	0,0012	0,3556	0,0012	0,3726	0,0149	0,1923	0,0053
6								
7	1,3470	0,0148	1,9927	0,0028	1,9776	0,0313	7,4231	0,0036
8								
9	0,8965	0,1097	0,7548	0,0165	1,3075	0,2023	0,5336	0,0368
10								
11	1,2377	0,0288	1,3723	0,0131	0,8154	0,3493	0,0112	0,0007
12								
13	0,8690	0,0664	0,8705	0,0681	0,6303	0,0682	1,2586	0,2748
14								
15	0,4431	0,0020	0,5211	0,0031	1,1516	0,7294	1,2162	0,3795
16								
17	0,6519	0,0071	1,0217	2,8358	0,5434	0,0391	2,5307	0,0169
18								
19	1,0498	0,5536	0,9376	0,3157	0,6426	0,0743	0,5935	0,0534
20								
21	1,0935	0,1639	1,1251	0,0942	1,7375	0,0476	4,5304	0,0064
22								
23	0,9624	0,8913	1,0700	0,2859	0,8173	0,3573	1,1285	0,9953
24								
25	2,3834	0,0017	3,3219	0,0009	0,6980	0,1125	2,3873	0,0192
26								
27	1,0898	0,1771	1,0820	0,2107	0,7338	0,1518	2,0337	0,0289
28								
29	0,8679	0,0652	0,8300	0,0377	0,7193	0,1340	1,9506	0,0326
30								
	K₁ prom.	0,1457	K₂ prom.	0,2951	K₃ prom.	0,1788	K₄ prom.	0,1379

MES: DICIEMBRE 2002

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	0,9624	0,8913	1,0700	0,2859	0,7533	0,1812	1,4277	0,1147
2								
3	0,4979	0,0027	0,3343	0,0011	1,1670	0,6096	1,3190	0,1897
4								
5	1,8760	0,0033	1,1146	0,1112	1,2085	0,4055	1,3450	0,1655
6								
7	1,0475	0,6077	0,7608	0,0175	1,3627	0,1518	0,5675	0,0453
8								
9	1,1343	0,0824	1,4453	0,0096	1,2528	0,2863	3,1847	0,0108
10								
11	1,0535	0,4819			1,2746	0,2471		
12								
13	0,7784	0,0208	0,9239	0,2086	0,7475	0,1717	0,3200	0,0112
14								
15	1,1649	0,0562	1,3521	0,0144	1,9613	0,0320	1,4900	0,0914
16								
17	0,3169	0,0010	0,2049	0,0005	0,6500	0,0784	0,8222	0,3795
18								
19	0,6671	0,0080	0,7666	0,0185	0,7712	0,2155	0,8000	0,2920
20								
21	1,1269	0,0916	0,9004	0,1188	0,8611	0,6506	0,8197	0,3677
22								
23	0,9294	0,2444	1,0867	0,1894	0,7432	0,1650	1,2162	0,3795
24								
25	0,9601	0,7898	1,0643	0,3373	0,6149	0,0615	0,5620	0,0438
26								
27	0,7439	0,0149	0,5184	0,0030	0,6717	0,0918	2,3156	0,0206
28								
29	0,6801	0,0088	0,9563	0,6548	0,7069	0,1209	0,3665	0,0144
30								
	K₁ prom.	0,2203	K₂ prom.	0,1408	K₃ prom.	0,2313	K₄ prom.	0,1519

MES: ENERO 2003

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
31	0,6605	0,0076	0,9563	0,6548	0,7033	0,1173	1,1731	0,5706
1								
2	1,4600	0,0091	1,0666	0,3147	1,3456	0,1650	2,3802	0,0193
3								
4	0,9506	0,5109	0,9041	0,1286	1,1430	0,8141	1,2278	0,3453
5								
6	0,5564	0,0038	0,4386	0,0019	0,8561	0,6021	0,6405	0,0733
7								
8	0,9601	0,7898	1,0643	0,3373	1,8976	0,0354	1,9653	0,0319
9								
10	1,4074	0,0112	1,9421	0,0030	1,1670	0,6096	1,3190	0,1897
11								
12	0,7003	0,0103	0,8932	0,1026	0,7222	0,1373	0,1322	0,0036
13								
14	0,9496	0,4896			0,8116	0,3337		
15								
16	1,0697	0,2880	0,6275	0,0060	1,4575	0,1024	0,4957	0,0295
17								
18	0,8925	0,1011	0,8260	0,0358	0,7911	0,2649	0,8466	0,5247
19								
20	1,0748	0,2516	1,3806	0,0126	1,3124	0,1967	1,3724	0,1451
21								
22	0,8721	0,0699	1,1550	0,0630	0,6424	0,0743	0,4842	0,0276
23								
24	0,5735	0,0042	0,9414	0,3592	0,6587	0,0834	0,8090	0,3238
25								
26	1,0600	0,3849	0,8911	0,0985	1,3039	0,2064	21,1250	0,0016
27								
28	1,1049	0,1314	1,1015	0,1401	1,5541	0,0748	1,2192	0,3701
29								
30	2,2845	0,0019	3,4291	0,0009	1,5546	0,0747	0,7295	0,1462
31								
	K₁ prom.	0,1916	K₂ prom.	0,1506	K₃ prom.	0,2433	K₄ prom.	0,1868

MES: FEBRERO 2003

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	0,5058	0,0028			0,5820	0,0496		
2								
3	0,9474	0,4487			0,8063	0,3138		
4								
5	1,0664	0,3162			1,1850	0,5045		
6								
7	1,0672	0,3094			0,8222	0,3792		
8								
9	1,1239	0,0959			1,2008	0,4344		
10								
11	1,3754	0,0129			0,8521	0,5676		
12								
13	1,0401	0,8450			1,1780	0,5418		
14								
15	2,2092	0,0021			1,4563	0,1029		
16								
17	0,7432	0,0149			0,6982	0,1126		
18								
19	0,9259	0,2207			1,2349	0,3266		
20								
21	0,4479	0,0020			0,5590	0,0430		
22								
23	1,3789	0,0127			1,2052	0,4172		
24								
25	1,4869	0,0083			6,1127	0,0044		
26								
27	1,5685	0,0065			0,6316	0,0689		
28								
	K₁ prom.	0,1641	K₂ prom.	0,0000	K₃ prom.	0,2762	K₄ prom.	0,0000

MES: MARZO 2003

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
1	1,0779	0,2325			1,2344	0,3278		
2								
3	0,9583	0,7210			0,8493	0,5448		
4								
5	0,9447	0,4037			1,1895	0,4830		
6								
7	0,9380	0,3191			1,2163	0,3793		
8								
9	0,9544	0,6013			1,1783	0,5399		
10								
11	0,9476	0,4516			1,2077	0,4081		
12								
13	1,1561	0,0622			1,3689	0,1474		
14								
15	0,0508	0,0001			0,2289	0,0067		
16								
17	1,3780	0,0127			1,5983	0,0661		
18								
19	0,7242	0,0126			1,1554	0,6965		
20								
21	1,8748	0,0033	1,0430	0,7399	13,4493	0,0022	97,2124	0,0007
22								
23	0,2060	0,0005	0,1528	0,0004	1,3706	0,1463	2,2222	0,0228
24								
25	1,6483	0,0052	1,3678	0,0133	3,3784	0,0098	1,2089	0,4039
26								
27	1,4285	0,0103	0,9169	0,1738	0,8156	0,3501	1,6003	0,0658
28								
29	1,1188	0,1038	0,8798	0,0798	1,7352	0,0479	1,3456	0,1650
30								
	K₁ prom.	0,1960	K₂ prom.	0,2014	K₃ prom.	0,2771	K₄ prom.	0,1316

MES: ABRIL 2003

DÍA	K para 2 cm y 5 cm				K para 10 cm y 20 cm			
	Horas I y II		Horas II y III		Horas I y II		Horas II y III	
	Y ₁	K ₁	Y ₂	K ₂	Y ₃	K ₃	Y ₄	K ₄
31	0,9637	0,9553	1,1022	0,1382	0,8769	0,8428	1,5787	0,0697
1								
2	1,0691	0,2928	1,2150	0,0345	1,4973	0,0892	1,1341	0,9182
3								
4	2,0613	0,0025	1,7122	0,0045	2,0158	0,0296	1,7415	0,0472
5								
6	0,8522	0,0512	0,8922	0,1007	1,3009	0,2101	2,9393	0,0125
7								
8	1,4434	0,0097	1,6035	0,0059	1,1424	0,8198	1,1720	0,5772
9								
10	0,5320	0,0033	0,4966	0,0027	0,3049	0,0103	0,2234	0,0065
11								
12	2,9428	0,0011	2,0127	0,0027	2,6901	0,0148	3,6094	0,0088
13								
14	0,8234	0,0346	0,6606	0,0076	0,7908	0,2639	0,6638	0,0866
15								
16	0,9517	0,5341	0,9645	0,9992	0,7862	0,2512	0,7800	0,2356
17								
18	1,4860	0,0083	1,2971	0,0193	2,0290	0,0290	1,9137	0,0345
19								
20	0,7000	0,0103	0,6522	0,0072	1,3061	0,2039	1,1335	0,9259
21								
22	0,9609	0,8220	0,9501	0,4997	1,3280	0,1807	1,3250	0,1836
23								
24	0,6988	0,0102	0,8707	0,0683	0,5716	0,0465	0,5696	0,0459
25								
26	6,1130	0,0004	7,8805	0,0003	0,9025	1,3816	0,3727	0,0149
27								
28	1,0385	0,9180	1,1181	0,1050	1,1655	0,6198	1,4706	0,0978
29								
	K₁ prom.	0,2436	K₂ prom.	0,1331	K₃ prom.	0,3329	K₄ prom.	0,2177

GLOSARIO DE TÉRMINOS USADOS EN ESTE ESTUDIO

Este Glosario está basado en los glosarios publicados en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC.

Aclimatación	Adaptación fisiológica a las variaciones climáticas.
Actividad solar	El Sol presenta períodos de gran actividad que se observan en una serie de manchas solares, además de producción radiactiva, actividad magnética, y emisión de partículas de gran energía. Estas variaciones tienen lugar en una serie de escalas temporales que van desde millones de años a minutos.
Actividades de aplicación conjunta (AAC)	<p>Fase piloto de la Aplicación conjunta, tal como se define en el Artículo 4.2a de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, que autoriza actividades conjuntas entre países desarrollados (y sus empresas) y entre países desarrollados y en desarrollo (y sus empresas).</p> <p>Las AAC están concebidas para que de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático adquieran experiencia en actividades para proyectos ejecutados de forma conjunta. Las AAC no devengan ningún crédito durante la fase piloto. Aún se debe decidir sobre el futuro de los proyectos de AAC y su relación con los Mecanismos de Kyoto.</p> <p>Como una forma sencilla de permisos comercializables, las AAC y otros esquemas basados en el mercado, son mecanismos que potencialmente pueden estimular flujos adicionales de recursos para la mejora del medio ambiente mundial. Véase también Mecanismo para un Desarrollo Limpio y Comercio de derechos de emisiones.</p>
Aire	Capa delgada de gases que cubre La Tierra y está conformado por nitrógeno, oxígeno y otros gases como el bióxido de carbono, vapor de

agua y gases inertes. Es esencial para la vida de los seres vivos. El Hombre inhala 14.000 litros de aire al día.

Ajustes de flujo

Para evitar que el problema de que las simulaciones generales combinadas de circulación atmósfera-océano nos desvíen hacia un estado climático no realista, se pueden aplicar ajustes a los flujos de calor y humedad de la atmósfera-océano (y a veces las presiones en la superficie que resultan de los efectos del viento sobre la superficie oceánica) antes de imponer estos flujos en la simulación oceánica y atmosférica.

Como estos ajustes se calculan de antemano y son, por lo tanto, independientes de la integración de la simulación combinada, no están correlacionados con las anomalías que se desarrollen durante la integración.

Albedo

Fracción de radiación solar reflejada por una superficie u objeto. A menudo se expresa como porcentaje. Las superficies cubiertas por nieve tienen un alto nivel de albedo; el albedo de los suelos puede ser alto o bajo; las superficies cubiertas de vegetación y los océanos tienen un bajo nivel de albedo.

El albedo de la Tierra varía principalmente debido a los niveles diferentes de nubes, nieve, hielo, vegetación y cambios en la superficie terrestre.

Análisis de estabilización

Se refiere a los análisis o escenarios que se ocupan de la estabilización de la concentración de gases de efecto invernadero.

Anomalías climáticas

El término anomalía climática es usado para describir la desviación del clima desde el punto de vista estadístico, es decir, la diferencia entre el valor del elemento climático en un periodo de tiempo determinado, por ejemplo un mes, con respecto al valor medio histórico o norma de la variable climática correspondiente, durante el mismo lapso, en un lugar dado.

Atmósfera	Cubierta gaseosa que rodea la Tierra. La atmósfera seca está formada casi en su integridad por nitrógeno (78,1%) y por oxígeno (20,9%), junto con una serie de pequeñas cantidades de otros gases como argón (0,93%), el helio, y gases radiativos de efecto invernadero como el dióxido de carbono (0,035%) y el ozono. Además, la atmósfera contiene vapor de agua, con una cantidad variable pero que es normalmente de un 1%. La atmósfera también contiene nubes y aerosoles.
Base de datos	Conjunto organizado e integrado de datos almacenados en computadora o presentados en tablas impresas, con el fin de facilitar su uso para aplicaciones con múltiples finalidades.
Biosfera (terrestre y marina)	Parte del sistema terrestre que comprende todos los ecosistemas y organismos vivos en la atmósfera, en la Tierra (biosfera terrestre), o en los océanos (biosfera marina), incluida materia orgánica muerta derivada (por ejemplo, basura, materia orgánica en suelos y desechos oceánicos).
Bosque	Tipo de vegetación dominada por árboles. En todo el mundo se utilizan muchas definiciones del término “bosque”, lo que refleja las amplias diferencias en las condiciones biogeofísicas, estructuras sociales, y economías.
Bosque tropical	También llamado selva húmeda. El bioma más complejo de la Tierra, caracterizado por una gran diversidad de especies, alta precipitación durante el año y temperaturas cálidas. Las precipitaciones pluviales pueden llegar a 100 mm en cuestión de minutos. El bosque de hoja ancha se mantiene verde durante todo el año.
Calentamiento global	Aumento de la temperatura de la Tierra debido al uso de combustibles fósiles y a otros procesos industriales que llevan a una acumulación de gases invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso y clorofluorocarbonos) en la atmósfera.

Desde 1896 se sabe que el dióxido de carbono ayuda a impedir que los rayos infrarrojos escapen al espacio, lo que hace que se mantenga una temperatura relativamente cálida en nuestro planeta (efecto invernadero). Sin embargo, el incremento de los niveles de dióxido de carbono puede provocar un aumento de la temperatura global, lo que podría originar importantes cambios climáticos con graves implicaciones para la productividad agrícola, pues puede modificar la composición de los pisos térmicos, alterar las estaciones de lluvia y aumentar el nivel del mar

Calor	Tipo de energía que se traslada entre dos sistemas en virtud a una diferencia en temperatura.
Calor específico	Cantidad de calor que se requiere para aumentar en una unidad de temperatura una unidad de masa de un material.
Calor latente	Cantidad de energía calorífica absorbida, por unidad de masa de una sustancia, durante un cambio de estado (de sólido a líquido, de líquido a gas) sin que haya un cambio de temperatura. Para el caso específico del aire, se refiere a la cantidad de energía debido al vapor de agua presente.
Cambio climático	<p>Importante variación estadística en el estado medio del clima o en su variabilidad, que persiste durante un período prolongado (normalmente decenios o incluso más). El cambio climático se puede deber a procesos naturales internos o a cambios en el forzamiento radiativo externo, o bien a cambios persistentes antropogénicos en la composición de la atmósfera o en el uso de las tierras. Se debe tener en cuenta que la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC), en su Artículo 1, define “cambio climático” como: “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”.</p> <p>La CMCC distingue entre “cambio climático” atribuido a actividades</p>

humanas que alteran la composición atmosférica y “variabilidad climática” atribuida a causas naturales.

Cambio climático rápido

La no linealidad del sistema climático puede llevar a un rápido cambio climático, lo que se denomina a veces fenómenos repentinos o incluso sorprendentes. Algunos de dichos cambios repentinos pueden ser imaginables, por ejemplo la rápida reorganización de la circulación termohalina, la rápida retirada de los glaciares, o la fusión masiva del permafrost, que llevaría a unos rápidos cambios en el ciclo de carbono. Otros pueden suceder sin que se esperen, como consecuencia del forzamiento radiativo y rápidamente cambiante de un sistema no lineal.

Cambio en el uso de las tierras

Un cambio en el uso o gestión de las tierras por los humanos, que puede llevar a un cambio en la cubierta de dichas tierras. La cubierta de las tierras y el cambio en el uso de las tierras pueden tener un impacto en el albedo, la evapotranspiración, y las fuentes y los sumideros de gases de efecto invernadero, u otras propiedades del sistema climático, y puede tener igualmente consecuencias en el clima, ya sea de manera local o mundial.

Capa freática

depósito subterráneo de agua, de disposición horizontal, que se encuentra por debajo del horizonte arcilloso del suelo y se alimenta del agua de infiltración

Clasificación de los usos del suelo

Existen numerosos sistemas de clasificación de usos del suelo, comprendidos en una de estas tres categorías: urbano, urbanizable (apto para ser urbanizado) y no urbanizable (espacios protegidos por su valor agrícola, forestal o ganadero, por sus recursos naturales, valor paisajístico, histórico, cultural o para preservar su flora, fauna o el equilibrio ecológico). Cada uno de estos grandes grupos comprende otras subdivisiones. Así, por ejemplo, la categoría urbana puede incluir un uso residencial o industrial del suelo, entre otros, y la no urbanizable puede englobar tanto un espacio rústico de aprovechamiento agropecuario como

un parque nacional.

La mayoría de los países y organizaciones estudiosas del tema emplean mapas de usos del suelo, que siguen los sistemas de clasificación que mejor reflejan sus circunstancias y permiten ser cartografiados con una relativa facilidad.

Clima

Efecto a largo plazo de la radiación solar sobre la superficie y la atmósfera de la Tierra en rotación. El modo más fácil de interpretarlo es en términos de medias anuales o estacionales de temperatura y precipitaciones.

En sentido estricto, se suele definir el clima como “estado medio del tiempo” o, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades pertinentes durante períodos que pueden ser de meses a miles o millones de años. El período normal es de 30 años, según la definición de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Las cantidades aludidas son casi siempre variables de la superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento), aunque en un sentido más amplio el “clima” es una descripción (incluso una descripción estadística) del estado del sistema climático.

Corresponde al promedio de los eventos meteorológicos que ocurren a diario en una región. Este récord histórico ayuda a caracterizar el comportamiento meteorológico de un área geográfica en el largo plazo. La palabra clima se deriva del griego KLIMA que significa inclinación y refleja la importancia que los estudiosos de la antigüedad atribuían a la influencia del sol.

Conducción

Transferencia de calor desde una molécula a otra a modo de impacto inelástico en el caso de los fluidos, a modo de oscilaciones en el caso de los sólidos no conductores de electricidad y a modo de movimiento de electrones en el caso de los sólidos conductores de electricidad (caso de

los metales). Es el mecanismo de transporte de calor predominante en el interior del suelo.

**Conductividad
térmica**

Cantidad de calor que pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de una muestra de extensión infinita y caras plano-paralelas y de espesor unidad, cuando se establece una diferencia de temperatura entre sus caras de un grado. La conductividad térmica es una propiedad característica de cada material, su valor puede depender de la temperatura y de una serie de factores tales como la densidad, porosidad, contenido de humedad, diámetro de fibra, tamaño de los poros y tipo de gas que encierre el material. Sus unidades son: kcal/m.h.°C (W/m.°C)

Convección

Se refiere a los movimientos turbulentos que ocurren al interior de un fluido produciendo mezcla y transporte de sus propiedades. En meteorología se utiliza generalmente para referirse a los movimientos verticales que involucran transporte de energía y vapor de agua.

Movimiento de aire desde la tierra hacia el cielo, la dirección del flujo de aire favorece la formación de nubosidad. Proceso que ocurre al interior de una baja presión.

Deforestación

Conversión de bosques en zonas no boscosas. Es el proceso de desaparición de los bosques o masas forestales, fundamentalmente causada por la actividad humana. Está directamente causada por la acción del hombre sobre la naturaleza, principalmente debido a las talas realizadas por la industria maderera, así como para la obtención de suelo para cultivos agrícolas.

**Degradación de
suelos**

Reducción o pérdida de la productividad biológica o económica y la complejidad de las tierras agrícolas de secano, las tierras de cultivo de regadío, los pastizales, los bosques y las tierras arboladas, ocasionada en zonas áridas, semiáridas y semihúmedas secas, por los sistemas de utilización de la tierra o por un proceso o una combinación de procesos,

incluidos los resultantes de actividades humanas y pautas de crecimiento poblacional.

Densidad	Es la proporción de la masa de una sustancia con el volumen que ocupa.
Desfase térmico	Diferencia horaria entre los valores pico de las ondas de temperatura en ambas caras de un cerramiento o entre las temperaturas exterior e interior de una edificación. Junto con el amortiguamiento, traduce el efecto de la inercia térmica del cerramiento o de la edificación.
Difusión térmica	Cociente entre la conductividad térmica y la capacidad calorífica.
Difusividad térmica	Parámetro que rige la propagación del calor al interior de los materiales (conducción+almacenamiento). Relaciona la variación de la temperatura en el tiempo con la variación de la temperatura en el espacio en el interior de un material. La difusividad es directamente proporcional a la conductividad e inversamente proporcional al calor específico y a la densidad. Se mide en m^2/s .
Dispersión	Grado de separación entre distintos valores experimentales, en relación a un valor distinguido.
Ecosistema	Sistema de organismos vivos que interactúan entre sí y su entorno físico. Los límites de lo que se puede denominar ecosistema son un poco arbitrarios, y dependen del enfoque del interés o estudio. Por lo tanto, un ecosistema puede variar desde unas escalas espaciales muy pequeñas hasta, en último término, todo el planeta.
Efecto invernadero	<p>Calentamiento progresivo del planeta provocado por la acción humana sobre el medio ambiente, debido fundamentalmente las emisiones de CO_2 resultantes de las actividades industriales intensivas y la quema masiva de combustibles fósiles.</p> <p>Los gases de efecto invernadero absorben la radiación infrarroja, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los</p>

mismos gases, y por las nubes. La radiación atmosférica se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la troposfera terrestre. A esto se le denomina “efecto invernadero natural”. La radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel al que se emite. En la troposfera, la temperatura disminuye generalmente con la altura. En efecto, la radiación infrarroja emitida al espacio se origina en altitud con una temperatura que tiene una media de $-19\text{ }^{\circ}\text{C}$, en equilibrio con la radiación solar neta de entrada, mientras que la superficie terrestre tiene una temperatura media mucho mayor, de unos $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero produce un aumento de la opacidad infrarroja de la atmósfera, y por lo tanto, una radiación efectiva en el espacio desde una altitud mayor a una temperatura más baja. Esto causa un forzamiento radiativo, un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie-troposfera. A esto se denomina “efecto invernadero aumentado”

El Niño

En su sentido original, es una corriente cálida que fluye periódicamente a lo largo de la costa de Ecuador y Perú, causando alteraciones en las pesquerías locales. Este fenómeno oceánico se asocia con una fluctuación de las pautas de presión intertropical en la superficie y la circulación en los Océanos Pacífico e Índico, llamada Oscilación Meridional, o ENOM.

Durante el fenómeno de El Niño, los vientos imperantes se debilitan y la contracorriente del ecuador se refuerza, lo que provoca que las aguas cálidas superficiales de la zona de Indonesia fluyan hacia el Este y cubran las aguas frías de las corrientes de Perú. Este fenómeno tiene un gran impacto en los vientos, la temperatura de la superficie marina, y las pautas de precipitación del Pacífico tropical. Tiene efectos climáticos en toda la región del Pacífico y en muchas otras partes del mundo. El

fenómeno opuesto a El Niño se llama La Niña.

Emisividad	Capacidad de una sustancia para emitir energía radiante. Se expresa como la relación del flujo de energía que emite un cuerpo con respecto al que emite un cuerpo negro ideal a la misma temperatura.
Enfriamiento	Transferencia de energía desde un sólido, líquido o gas, generada por un gradiente de temperatura que va desde ese sólido, líquido o gas hacia su entorno o hacia un sumidero de calor, el cual se encuentra a menor temperatura.
Enfriamiento convectivo	Enfriamiento producido por el cambio de aire interior por aire exterior, si este último está a una temperatura más baja que la del aire interior.
Enfriamiento de aire	Reducción de la temperatura del aire causada por la extracción del calor, como resultado de su contacto con un medio que se mantiene a una temperatura menor que el aire. El enfriamiento puede estar acompañado por adicción de humedad (evaporación) o reducción de la misma (deshumidificación), o bien puede realizarse sin cambio de humedad.
Enfriamiento evaporativo	Proceso que involucra el intercambio adiabático entre el aire y una superficie húmeda o agua esperada. El agua adquiere la temperatura de bulbo húmedo del aire, la cual permanece constante a lo largo del intercambiador.
Escenario climático	Representación plausible y a menudo simplificada del clima futuro, basada en un conjunto internamente coherente de relaciones climatológicas, que se construye para ser utilizada de forma explícita en la investigación de las consecuencias potenciales del cambio climático antropogénico, y que sirve a menudo de insumo para las simulaciones de los impactos. Las proyecciones climáticas sirven a menudo como materia prima para la construcción de escenarios climáticos, pero los escenarios climáticos

requieren información adicional, por ejemplo, acerca del clima observado en un momento determinado. Un “escenario de cambio climático” es la diferencia entre un escenario climático y el clima actual.

**Escenario de
forzamiento
radiativo**

Representación plausible del desarrollo futuro del forzamiento radiativo asociado, por ejemplo, con cambios en la composición atmosférica o en el uso de las tierras, o en factores externos como las variaciones en la actividad solar.

Los escenarios de forzamiento radiativo se pueden utilizar como insumos en simulaciones climáticas simplificadas para el cálculo de proyecciones climáticas.

**Estación
meteorológica**

es una instalación destinada a medir y registrar regularmente diversas variables meteorológicas. Estos datos se utilizan tanto para la elaboración de predicciones meteorológicas a partir de modelos numéricos como para estudios climáticos.

Estimación

Valor que se da y en que se tasa o considera una cosa, sin conocerlo a ciencia exacta.

Evapotranspiración

Proceso combinado de evaporación de la superficie terrestre y transpiración de la vegetación.

Expansión térmica

Se refiere al aumento o disminución de las características espaciales de los cuerpos (y la disminución de densidad) que resulta de un cambio de temperatura.

**Experimentos
climáticos
transitorios y en
equilibrio**

Un “experimento climático en equilibrio” es un experimento por el que se permite que una simulación climática se ajuste completamente a un cambio en el forzamiento radiativo. Tales experimentos proporcionan información sobre la diferencia entre los estados inicial y final de una simulación, pero no sobre la respuesta que depende del tiempo.

Si se permite que el forzamiento evolucione gradualmente según un escenario de emisión prescrito, se puede analizar la respuesta que

depende del tiempo de una simulación climática. Dichos experimentos se denominan “experimentos climáticos transitorios”.

Extremo climático	Un promedio de las situaciones meteorológicas extremas que se producen a lo largo de un cierto periodo de tiempo. Una situación meteorológica extrema es un acontecimiento raro dentro de la distribución estadística de referencia en un determinado lugar, como por ejemplo el percentil 10 o el percentil 90 de dicha distribución.
Flujo de calor	Cantidad de calor que pasa por un determinado perímetro en una unidad de tiempo ($J/s = Watt$).
Forzamiento radiativo	<p>Cambio en la irradiación neta vertical (expresada en W/m^2) en la tropopausa debido a un cambio interno o un cambio en el forzamiento externo del sistema climático (por ejemplo, un cambio en la concentración de dióxido de carbono o la potencia del Sol).</p> <p>Normalmente el forzamiento radiativo se calcula después de permitir que las temperaturas estratosféricas se reajusten al equilibrio radiativo, pero manteniendo fijas todas las propiedades troposféricas en sus valores sin perturbaciones.</p>
Geotermómetro	Mineral o asociación de minerales que permiten determinar la temperatura que reinaba durante su formación.
Humedad absoluta	La cantidad de vapor de agua que contiene el aire. Se confunde frecuentemente con la humedad relativa o punto de rocío. Los tipos de humedad son: humedad absoluta, humedad relativa y humedad específica.
Humedad del suelo	Cantidad de agua almacenada dentro o en la superficie de las tierras que se encuentra disponible para la evaporación.
Humedad relativa	Tipo de humedad que se basa en el cociente entre la presión actual del vapor del aire y la saturación de la presión del vapor. Usualmente se

expresa en porcentajes.

Joule (J) Unidad de medida de la transferencia de energía mecánica (trabajo) o energía térmica (calor) ($1 \text{ J} = 0,24 \text{ cal}$)

Ley de fourier de la conducción de calor Establece que la rapidez de flujo por conducción en un sentido dado es proporcional al gradiente de temperatura en ese sentido y al área normal a la dirección del flujo de calor.

Meteorología Estudio científico de la atmósfera de la Tierra. Incluye el estudio de las variaciones diarias de las condiciones atmosféricas (meteorología sinóptica), el estudio de las propiedades eléctricas, ópticas y otras de la atmósfera (meteorología física); el estudio del clima, las condiciones medias y extremas durante largos periodos de tiempo (climatología), la variación de los elementos meteorológicos cerca del suelo en un área pequeña (micrometeorología) y muchos otros fenómenos. El estudio de las capas más altas de la atmósfera (superiores a los 20 km o los 25 km) suele implicar el uso de técnicas y disciplinas especiales, y recibe el nombre de aeronomía. El término aerología se aplica al estudio de las condiciones atmosféricas a cualquier altura.

Ciencia y estudio de los fenómenos atmosféricos. Varias de las áreas que abarca la meteorología son por ejemplo: la agricultura, la aviación, la hidrometeorología y las meteorologías física, dinámica, operacional y sinóptica. Un meteorólogo es un científico que estudia la atmósfera y los fenómenos atmosféricos.

Patrones de variabilidad del clima La variabilidad natural del sistema climático, y en particular la que se produce en escalas de tiempo estacionales o mayores, que se debe a las características no-lineales de la circulación atmosférica o a las interacciones con la superficie oceánica o el suelo, ocurre predominantemente siguiendo unos determinados patrones espaciales.

Estos patrones, también se llaman regímenes o modos. Los ejemplos más

conocidos son la conjunción entre El Niño y la Oscilación del Sur, que se conoce por las siglas inglesas ENSO, y la llamada Oscilación del Atlántico Norte conocida por las siglas inglesas NAO.

Perfil

Conjunto de concentraciones que cambia de forma suave y representa una vía posible hacia la estabilización. La palabra “perfil” se utiliza para distinguir dichas vías de las vías de emisiones, a las que nos referimos habitualmente como “escenarios”.

Porosidad

Es una propiedad física del suelo y de la roca. Está definida como la proporción de la cantidad de espacio poroso presente en una muestra de suelo y el volumen total de la muestra. Los vacíos o huecos pueden estar entre los granos de arena o grava, en las fracturas o grietas en la cama de piedra, o en los vacíos grandes en donde la roca fue disuelta por el agua subterránea.

Potencial de calentamiento mundial (PCM)

Índice que describe las características radiativas de los gases de efecto invernadero bien mezclados y que representa el efecto combinado de los diferentes tiempos que estos gases permanecen en la atmósfera y su eficiencia relativa en la absorción de radiación infrarroja saliente. Este índice se aproxima el efecto de calentamiento integrado en el tiempo de una masa-unidad de determinados gases de efecto invernadero en la atmósfera actual, en relación con una unidad de dióxido de carbono.

Precipitación

Cualquier y todas las formas del agua, en estado líquido o sólido, que cae de hasta llegar a la tierra. Esto incluye la lluvia, llovizna, llovizna helada, lluvia granizo, hielo granulado, nieve, granizo menudo y bolillas de nieve.

Predicción climática

Resultado de un intento de producir la descripción o la mejor estimación de la evolución real del clima en el futuro (a escalas temporales estacionales, interanuales o a largo plazo).

Presión atmosférica	<p>Es la presión o el peso que ejerce la atmósfera en un punto determinado. La medición puede expresarse en varias unidades de medidas: hectopascales, en milibares, pulgadas o milímetros de mercurio. También se conoce como presión barométrica.</p>
Protocolo de Kyoto	<p>El Protocolo de Kyoto a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) se adoptó en el tercer periodo de sesiones de la Conferencia de las Partes de la CMCC en 1997 en Kyoto, Japón.</p> <p>Contiene unos compromisos legales vinculantes, además de los incluidos en la CMCC. Los países, la mayoría de los países en la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE), y los países con economías en transición, acordaron la reducción de sus emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, y hexafluoruro de azufre) a al menos un 5 por ciento por debajo de los niveles en 1990 durante el período de compromiso de 2008 al 2012.</p>
Radiación difusa	Radiación solar difundida por la atmósfera (por lo que no llega directamente del sol).
Radiación directa	Radiación solar que llega directamente del disco solar.
Radiación infrarroja	<p>Radiación emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera, y las nubes. Es conocida también como radiación terrestre o de onda larga. La radiación infrarroja tiene una gama de longitudes de onda (espectro) que es más larga que la longitud de onda del color rojo en la parte visible del espectro.</p> <p>El espectro de la radiación infrarroja es diferente al de la radiación solar o de onda corta debido a la diferencia de temperatura entre el Sol y el sistema Tierra-atmósfera.</p>

Radiación solar	<p>Radiación emitida por el Sol. También se denomina radiación de onda corta. La radiación solar tiene una gama específica de longitudes de onda (espectro) determinado por la temperatura del Sol.</p> <p>Principal fuente de calentamiento de las edificaciones en regiones de clima tropical. La radiación emitida por el sol es parcialmente absorbida por los cerramientos expuestos, calentándose y transmitiendo el calor absorbido al interior. La radiación solar puede así mismo penetrar directamente por las aberturas. La cantidad de radiación solar que llega a la edificación depende sobre todo de la latitud, la época del año, la orientación, el ángulo de la superficie receptora y las condiciones de la atmósfera.</p>
Radiación térmica	Ondas caloríficas emanadas de los cuerpos, que se diferencian de las ondas luminosas por su mayor longitud y menor frecuencia.
Régimen de temperatura	
Regionalización climática de Holdridge	<p>Son rangos propuestos por Holdridge. Estos rangos coinciden exactamente con la clasificación de pisos térmicos de Caldas. Los rangos de precipitación sin embargo, presentan algunos tipos de clima no aplicables a nuestro país en el cual prácticamente no se presentan regímenes con menos de 250 mm anuales, al menos en los sitios de medición. Es por ello que climas tales como desierto húmedo tropical, matorral desértico premontano o tundra seca alpina, no han sido identificados en áreas significativas del país. De todas maneras, la clasificación de Holdridge fue desarrollada en condiciones tropicales y se ajusta muy bien en la descripción de las condiciones climáticas de la mayoría de regiones de nuestro país.</p>
Regresión	Expresa la relación existente entre las dos características de una variable bidimensional.
Respuesta climática	Mecanismo de interacción entre procesos en el sistema climático, cuando

el resultado de un proceso inicial desencadena cambios en un segundo proceso que, a su vez, afecta al primero. Una respuesta positiva intensifica el proceso original, y una negativa lo reduce.

Retardo

Desfase de la onda de calor entrante y saliente de un cerramiento con inercia térmica (horas).

Sensibilidad del clima

En los informes del IPCC, la “sensibilidad de equilibrio del clima” suele hacer referencia al cambio (en condiciones del equilibrio) de la temperatura media de la superficie mundial a raíz de una duplicación de la concentración atmosférica de CO₂ (o de CO₂ equivalente).

En términos más generales, hace referencia al cambio, en condiciones de equilibrio, de la temperatura del aire cuando el forzamiento radiativo varía en una unidad (°C/W.m₂). En la práctica, la evaluación de la sensibilidad del clima en condiciones de equilibrio requiere unas simulaciones muy extensas junto a simulaciones generales de circulación. La “sensibilidad climática efectiva” es una medida relacionada con esto que sortea este requisito. Se evalúa a partir de una simulación para condiciones en evolución que no están en equilibrio. Es una medida de la fuerza de las respuestas en un momento determinado que pueden variar con el historial de los forzamientos y el estado climático.

Sistema climático

Sistema muy complejo que consiste en cinco componentes principales: la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera, y las interacciones entre ellas. El sistema climático evoluciona en el tiempo bajo la influencia de su propia dinámica interna debido a forzamientos externos (por ejemplo, erupciones volcánicas, variaciones solares, y forzamientos inducidos por el hombre tales como la composición cambiante de la atmósfera y el cambio en el uso de las tierras).

Suelo	Cubierta superficial de la mayoría de la superficie continental de la Tierra. Es un agregado de minerales no consolidados y de partículas orgánicas producidas por la acción combinada del viento, el agua y los procesos de desintegración orgánica.
Temperatura	Medida del movimiento molecular de una sustancia. Se mide usando una escala arbitraria a partir del cero absoluto, donde las moléculas teóricamente dejan de moverse. En observaciones de la superficie, se refiere principalmente al aire libre o temperatura ambiental cerca a la superficie de la tierra.
Temperatura máxima media mensual	Es un promedio aritmético de las temperaturas máximas diurnas registradas durante un mes por un lapso de varios años.
Temperatura media	Promedio de lecturas de temperatura tomadas durante un período de tiempo determinado. Por lo general, es el promedio entre la temperatura máxima y mínima.
Temperatura mínima media mensual	Es un promedio aritmético de las temperaturas mínimas diurnas registradas durante un mes por un lapso de varios años.
Temperatura promedio diaria	Temperatura promedio para un día que se obtiene haciendo un promedio de las lecturas de cada hora o, también, de las temperaturas máximas y mínimas.
Teoría del transporte	En esta teoría se considera que el agua es un importante componente del sistema suelo en el cual, dependiendo de su contenido y potencial, influye de diversas maneras sobre su comportamiento biológico, químico y físico. Si se considera únicamente el aspecto de tipo físico, se ha establecido que el estado hídrico afecta las propiedades mecánicas, térmicas y conductivas del sistema suelo.

El estudio del aspecto hídrico en el sistema suelo se puede abordar desde dos perspectivas: estática y dinámica. Desde un punto de vista estático interesan los aspectos de contenido y potencial del agua. En cambio, en el análisis dinámico interesa el movimiento del agua en los suelos y las propiedades conductivas de éstos.

Las plantas no pueden crecer sin agua. Sin embargo, el crecimiento de las plantas no depende, estrictamente hablando, del contenido de humedad de los suelos, sino del potencial del agua asociado a dichos contenidos. Descontando problemas de concentraciones limitantes de solutos, el componente relevante del potencial hídrico total es, el denominado potencial hidráulico, por cuanto su gradiente inducirá flujo de agua en el sistema suelo-planta.

La ecuación que describe el flujo de agua en el suelo, en condiciones isotérmicas y en equilibrio dinámico, es la ley de Darcy. Esta ley toma en cuenta aspectos como el flujo de agua, la conductividad hidráulica y es la distancia en el suelo considerado.

El tipo de flujo descrito por la ley de Darcy presenta algunas particularidades fundamentales: a) corresponde a una cantidad vectorial, por lo tanto queda completamente definido por su magnitud, dirección y sentido; b) considerando la complejidad del sistema suelo en cuanto a su naturaleza de medio poroso, la velocidad de flujo macroscópica, equivalente al promedio de las velocidades microscópicas existentes en la unidad de volumen del sistema, ignorándose el detalle geométrico y tomándose el medio permeable como un cuerpo hidráulicamente uniforme; c) corresponde a un flujo de tipo laminar, considerándose que esta condición se cumple en la mayoría de los casos de escurrimiento, en que, los materiales presentan una granulometría más fina que el limo. En materiales arenosos y con gradientes hidráulicos superiores a la unidad, puede ocurrir flujo turbulento y la ley de Darcy deja de tener validez. d) representa un proceso en equilibrio dinámico; esto significa que la

densidad de flujo no experimenta variaciones en la expansión.

Termógrafo	Es esencialmente un termómetro que se autoregistra. Es un termómetro que registra continuamente la temperatura en una cartilla.
Termómetro de bulbo seco	Termómetro usado para medir la temperatura ambiental. La temperatura registrada es considerada idéntica a la temperatura del aire. Es uno de los dos termómetros que conforman el psicrómetro.
Transferencia de calor	<p>En física, proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos pueden tener lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos. Por ejemplo, el calor se transmite a través de la pared de una casa fundamentalmente por conducción, el agua de una cacerola situada sobre un quemador de gas se calienta en gran medida por convección, y la Tierra recibe calor del Sol casi exclusivamente por radiación.</p> <p>El calor sólo puede transferirse si existe una diferencia de temperatura y únicamente se transfiere en el sentido de caliente a frío.</p>
Transferencia de calor latente	Calor que se gana o se pierde durante un cambio de fase de una sustancia, sin que haya cambio de temperatura en esa sustancia (de sólido a líquido o gaseoso o viceversa).
Transferencia de calor radiativa	Transferencia de calor que se genera por emisión de ondas electromagnéticas entre dos superficies que se encuentran a diferente temperatura y están expuestas la una a la otra, pero sin tocarse.
Transferencia de calor sensible	Cantidad de calor que absorbe o transfiere una sustancia produciendo un cambio de temperatura y sin que se produzca un cambio de fase.
Transferencia	Flujo de calor por conducción, convección y/o radiación en estado

térmica

estacionario desde o hacia un cuerpo a través de un aislante térmico con los medios circundantes externos. Es expresado como la relación de tiempo de flujo de calor por unidad de área de la superficie del cuerpo entre la diferencia de temperatura unitaria de la superficie del cuerpo con su medio circundante.

Usos del suelo

Engloba los diferentes usos que el hombre puede hacer de la tierra, su estudio y los procesos que llevan a determinar el más conveniente en un espacio concreto. Menos del 30% de la superficie de nuestro planeta es tierra. No toda ella puede ser utilizada por los humanos, motivo por el cual constituye un recurso natural valioso y sometido, en muchas partes del mundo, a una notable presión. En consecuencia, es importante tener una visión correcta del uso que se le está dando a un espacio concreto y de si éste es el más apropiado.

En los últimos años, se han producido grandes avances en las técnicas de análisis y representación cartográfica que se utilizan en el estudio de los usos del suelo, mientras que el tamaño de las áreas objeto del mismo ha sido incrementado.

Lo anterior tiene implicaciones sociales y económicas para los que se gestionan las tierras (por ejemplo el pastoreo, la extracción de madera y la conservación).

Variabilidad del clima

La variabilidad del clima se refiere a las variaciones en el estado medio y otros datos estadísticos (como las desviaciones típicas, la ocurrencia de fenómenos extremos, etc.) del clima en todas las escalas temporales y espaciales, más allá de fenómenos meteorológicos determinados. La variabilidad se puede deber a procesos internos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna), o a variaciones en los forzamientos externos antropogénicos (variabilidad externa).